

Décembre 2014
volume n° 4 / numéro n° 2
www.agronomie.asso.fr

Agronomie

environnement & sociétés

La revue de l'association française d'agronomie



Variétés et systèmes de culture

Quelle co-évolution ? Quelles implications pour l'agronomie et la génétique ?

Association Française
AGRONOMIE

Agronomie, Environnement & Sociétés

Revue éditée par l'Association française d'agronomie (Afa)

Siège : 16 rue Claude Bernard, 75231 Paris Cedex 05.

Secrétariat : 2 place Viala, 34060 Montpellier Cedex 2.

Contact : douhairi@supagro.inra.fr, T : (00-33)4 99 61 26 42, F : (00-33)4 99 61 29 45

Site Internet : <http://www.agronomie.asso.fr>

Objectif

AE&S est une revue en ligne à comité de lecture et en accès libre destinée à alimenter les débats sur des thèmes clefs pour l'agriculture et l'agronomie, qui publie différents types d'articles (scientifiques sur des états des connaissances, des lieux, des études de cas, etc.) mais aussi des contributions plus en prise avec un contexte immédiat (débats, entretiens, témoignages, points de vue, controverses) ainsi que des actualités sur la discipline agronomique.

ISSN 1775-4240

Contenu sous licence Creative commons



Les articles sont publiés sous la *licence Creative Commons 2.0*. La citation ou la reproduction de tout article doit mentionner son titre, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue AE&S et de son URL, ainsi que la date de publication.

Directeur de la publication

Marc BENOÎT, président de l'Afa, Directeur de recherches, Inra

Rédacteur en chef

Olivier RÉCHAUCHÈRE, chargé d'études Direction de l'Expertise, Prospective & Etudes, Inra

Membres du bureau éditorial

Pierre-Yves LE GAL, chercheur Cirad

Hervé SAINT MACARY, directeur adjoint du département Persyst, Cirad

Philippe PRÉVOST, directeur Agreenium Université en ligne

Danielle LANQUETUIT, consultante Triog et webmaster Afa

Comité de rédaction

- Marc BENOÎT, directeur de recherches Inra
- Valentin BEAUVAL, agriculteur
- Jacques CANEILL, directeur de recherches Inra
- Joël COTTART, agriculteur
- Thierry DORÉ, professeur d'agronomie AgroParisTech
- Sarah FEUILLETTE, cheffe du Service Prévision Evaluation et Prospective Agence de l'Eau Seine-Normandie
- Yves FRANCOIS, agriculteur
- Jean-Jacques GAILLETON, inspecteur d'agronomie de l'enseignement technique agricole
- François KOCKMANN, chef du service agriculture-environnement Chambre d'agriculture 71
- Marie-Hélène JEUFFROY, directrice de recherche Inra et agricultrice
- Aude JOMIER, enseignante d'agronomie au lycée agricole de Montpellier
- Jean-Marie LARCHER, responsable du service Agronomie du groupe Axérial
- François LAURENT, chef du service Conduites et Systèmes de Culture à Arvalis-Institut du végétal
- Francis MACARY, ingénieur de recherches Irstea
- Jean-Robert MORONVAL, enseignant d'agronomie au lycée agricole de Chambray, EPLEFPA de l'Eure
- Christine LECLERCQ, professeure d'agronomie Institut Lassalle-Beauvais
- Adeline MICHEL, Ingénieure du service agronomie du Centre d'économie rurale de la Manche
- Philippe POINTEREAU, directeur du pôle agro-environnement à Solagro
- Philippe PRÉVOST, directeur Agreenium Université en Ligne
- Hervé SAINT MACARY, directeur adjoint du Département Persyst, Cirad

Secrétaire de rédaction

Philippe PREVOST

Assistantes éditoriales

Sophie DOUHAIRIE et Danielle LANQUETUIT

Conditions d'abonnement

Les numéros d'AE&S sont principalement diffusés en ligne. La diffusion papier n'est réalisée qu'en direction des adhérents de l'Afa ayant acquitté un supplément
(voir conditions à <http://www.agronomie.asso.fr/espace-adherent/devenir-adherent/>)

Périodicité

Semestrielle, numéros paraissant en juin et décembre

Archivage

Tous les numéros sont accessibles à l'adresse <http://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/>

Soutien à la revue

- En adhérant à l'Afa via le site Internet de l'association (<http://www.agronomie.asso.fr/espace-adherent/devenir-adherent/>). Les adhérents peuvent être invités pour la relecture d'articles.
- En informant votre entourage au sujet de la revue AE&S, en disséminant son URL auprès de vos collègues et étudiants.
- En contactant la bibliothèque de votre institution pour vous assurer que la revue AE&S y est connue.
- Si vous avez produit un texte intéressant traitant de l'agronomie, en le soumettant à la revue. En pensant aussi à la revue AE&S pour la publication d'un numéro spécial suite à une conférence agronomique dans laquelle vous êtes impliqué.

Instructions aux auteurs

Si vous êtes intéressé(e) par la soumission d'un manuscrit à la revue AE&S, les recommandations aux auteurs sont disponibles à l'adresse suivante :

<http://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/pour-les-auteurs/>

À propos de l'Afa

L'Afa a été créée pour faire en sorte que se constitue en France une véritable communauté scientifique et technique autour de cette discipline, par-delà la diversité des métiers et appartenances professionnelles des agronomes ou personnes s'intéressant à l'agronomie. Pour l'Afa, le terme agronomie désigne une discipline scientifique et technologique dont le champ est bien délimité, comme l'illustre cette définition courante : « *Etude scientifique des relations entre les plantes cultivées, le milieu [envisagé sous ses aspects physiques, chimiques et biologiques] et les techniques agricoles* ». Ainsi considérée, l'agronomie est l'une des disciplines concourant à l'étude des questions en rapport avec l'agriculture (dont l'ensemble correspond à l'agronomie au sens large). Plus qu'une société savante, l'Afa veut être avant tout un carrefour interprofessionnel, lieu d'échanges et de débats. Elle se donne deux finalités principales : (i) développer le recours aux concepts, méthodes et techniques de l'agronomie pour appréhender et résoudre les problèmes d'alimentation, d'environnement et de développement durable, aux différentes échelles où ils se posent, de la parcelle à la planète ; (ii) contribuer à ce que l'agronomie évolue en prenant en compte les nouveaux enjeux sociétaux, en intégrant les acquis scientifiques et technologiques, et en s'adaptant à l'évolution des métiers d'agronomes.

Lisez et faites lire AE&S !

Sommaire

P7// Avant-propos

O. RÉCHAUCHÈRE (Rédacteur en chef) et M. BENOÎT (Président de l'Afa)

P9// Édito

M.H. JEUFFROY, D. BAZILE, V. BEAUVAL, X. PINOCHET et T. DORÉ (coordonnateurs du numéro)

P11// Objectifs de production et variétés

P13- Variétés et itinéraires techniques du blé : une évolution vers la diversification

A. GAUFFRETEAU (Inra), G. CHARMET (Inra), M.H. JEUFFROY (Inra), J. LE GOUIS (Inra), J.M. MEYNARD (Inra), B. ROLLAND (Inra)

P23- Variétés et systèmes de culture de tomate : les apports conjoints de la génétique et de l'agronomie

F. LECOMPTE (Inra) et M. CAUSSE (Inra)

P35- Réflexions sur l'évolution des cépages et des modes de conduite de la vigne dans le saumurois

A. HILLAIRE (Vigneron)

P37- L'inscription au catalogue officiel : un outil évolutif au service d'une agriculture durable

F. MASSON (GEVES), C. LECLERC (GEVES)

P47- Etude préliminaire à la caractérisation du comportement des variétés de colza oléagineux d'hiver dans des itinéraires techniques particuliers sur la base du réseau CTPS existant

(Article dont la première publication a été faite dans la revue en ligne Innovations agronomiques, volume 35 / Mai 2014)

P. BAGOT (GEVES), F. SALVI (CETIOM), J. GOMBERT (GEVES)

P55- Quelle place de la génétique dans le futur avec la perspective d'augmenter la production et d'apporter une contribution positive à l'environnement : exemple des céréales

P. GATE (ARVALIS Institut du végétal)

P63// Explorer la relation Génotype x Environnement

P65- Conception d'idéotypes variétaux en réponse aux nouveaux contextes agricoles et environnementaux

P. DEBAEKE (Inra), A. GAUFFRETEAU (Inra), C.E. DUREL (Inra), M.H. JEUFFROY (Inra)

P75- De l'interaction G x E aux interactions G x Y x L x C x R x D x S x A : une approche participative et pluridisciplinaire

D. DESCLAUX (Inra), Y. CHIFFOLEAU (Inra), J.M. NOLOT (Inra)

P85- Effets de la latitude sur l'expression du photopériodisme du mil et du sorgho : validation des cartes d'adaptation variétale au Mali

A. FOUNÉ (Icrisat, Mali), M. SAKO (Cirad), M. VAKSMANN (Université Paris 8), M. KOURESSY (IER, Mali)

P95// Quelles perspectives offre la prise en compte des aspects spatio-temporels de la diversité génétique ?

P97- Variétés et systèmes de culture : élargissement des échelles spatiales, quelques exemples pour les espèces oléagineuses

X. PINOCHET (CETIOM)

P103- Associer des variétés pour la production et maîtriser les maladies

T. VIDAL (Inra), C. GIGOT (AgroParisTech), M. BELHAJ FRAJ (ICBA, Dubaï), M. LECONTE (Inra), L. HUBER (Inra), S. SAINT-JEAN (AgroParisTech), C. DE VLLAVIEILLE-POPE (Inra)

P113- Le mélange de variétés en blé : une pratique devenant plus fréquente

E. DENIS (CIVAM Sarthe)

P115- Impact de la diffusion d'une variété améliorée de sorgho au Mali : interaction avec les variétés locales

M. KOURESSY, S. SISSOKO, N. TÉMÉ, M. DEU, M. VAKSMANN, Y. CAMARA D. BAZILE, A. F.M. SAKO, A. SIDIBÉ

P125// Quel potentiel de modèles alternatifs d'amélioration des plantes ?

P127- Questions induites par la diffusion des variétés de tournesol tolérantes à des herbicides de la famille des inhibiteurs de l'ALS

V. BEAUVAL (Agriculteur)

P135- Les variétés de soja tolérantes aux herbicides, moteur de la spécialisation agricole dans la région pampéenne argentine

C. SALEMBIER (Inra), S. GROSSO (UNL, Argentine), J.M. MEYNARD (Inra)

P143- Inscription d'une variété de sorgho obtenue par sélection participative au Mali dans des projets multi-acteurs

T. LEROY (Cirad), O. COUMARE (AOPP – Mali), M. KOURESSY (IER – Mali), G. TROUCHE (Cirad), A. SIDIBE (IER – Mali), S. SISSOKO (IER – Mali), A. TOURÉ (IER – Mali), T. GUINDO (COAP – Mali), B. SOGOBA (AMEDD – Mali), F. DEMBELÉ (GRAADECOM – Mali), B. DAKOUO (UACT – Mali), M. VAKSMANN (Cirad), H. COULIBALY (IER – Mali), D. BAZILE (Cirad), D. DESSAUW (Cirad)

P153- Mise en œuvre de nouvelles stratégies de sélection du sorgho pour les régions marginales et à forte contrainte climatique du Mali

A. BOUBACAR (IER – Mali), A. DAOU (Icrisat – Mali), E. WELTZIEN (Icrisat – Mali), B. DAKOUO (UACT – Mali), B. SOGOBA (AMEDD – Mali)

Mali), O. NIANGALY (IPR/IFRA – Mali), S.B. COULIBALY (IER – Mali), H. Moussa MAIGA (USTT – Mali), B. KONÉ (UACT– Mali), H. MAIGA (AMEDD – Mali), G. TROUCHE (Cirad), K. VOM BROCKE (Cirad)

P165- Mobiliser la diversité génétique pour un choix variétal plus large ; blocages et opportunités en agronomie et en génétique

C. BILLOT (Cirad), C. LECLERC (Cirad), S. LOUAFI (Cirad), A. BARNAUD (Ird), X. PERRIER (Cirad)

P169// **Annexe**

P171- Appel à contribution du numéro

P173// **Note de lecture**

P175- La palme des controverses – Palmier à huile et enjeux de développement (A. Rival et P. Lelang, Editions QUAE, 2013)

T. DORÉ (AgroParisTech)

P177// **Texte hors thématique du numéro**

P179- Les « carnets de plaine » des agriculteurs : une source d'information sur l'usage des pesticides à l'échelle de bassins versants

C. SCHOTT (Inra), F. BARATAUD (inra), C. MIGNOLET (Inra)



Avant-propos

Olivier RÉCHAUCHÈRE

Rédacteur en chef

Marc BENOÎT

Directeur de publication

Depuis la création de la revue et à l'exception du volume 2 numéro 2, les livraisons d'Agronomie, Environnement & Sociétés se sont toujours appuyées sur un événement ou une activité organisés au préalable par l'Afa : débats de l'assemblée générale de l'association, activités de ses groupes de travail thématiques, entretiens du Pradel, journée thématique. Ce lien fort entre les activités de l'association et sa revue est une relation à bénéfices réciproques. La revue bénéficie ainsi de tout le travail qui est effectué par les groupes de préparation et des échanges qui se déroulent lors de ces événements ou au sein des groupes de travail thématiques ; en retour, la revue donne une visibilité et une pérennité à ces événements et activités, et permet une capitalisation des connaissances agronomiques. Bien entendu, la revue ne se limite pas strictement à « rendre compte » mais cherche à élargir la gamme des contributions sur la thématique traitée, en sollicitant de façon ciblée des contributeurs potentiels. Un numéro de la revue accueille un nombre de contributions bien supérieur à ce qui peut être présenté lors d'une demi-journée de débats d'assemblée générale.

Ce nouveau numéro s'inscrit dans cette même perspective « symbiotique », mais apporte une innovation éditoriale majeure. Il est issu des débats qui ont été organisés lors de l'AG de l'association en mars 2013, mais son contenu a pour la première fois reposé sur l'élaboration d'un appel à contributions en bonne et due forme. La rédaction de cet appel a donné lieu à des échanges très riches au sein du comité de rédaction du numéro, et a permis d'en préciser l'orientation ainsi que de préfigurer son sommaire. L'appel à contributions a été rendu public sur le site de l'Afa et largement diffusé. La revue se donne ainsi les moyens de recevoir des contributions spontanées sur la thématique du numéro, au-delà de celles obtenues par sollicitation directe et ciblée. Ce mode de fonctionnement éditorial est d'ores et déjà reconduit pour les numéros à venir, dont les appels à contribution sont consultables sur le site de l'Afa.

Autre fait éditorial inédit, ce numéro inclut un article précédemment publié dans la revue « Innovations Agronomiques » et qui nous semblait particulièrement pertinent au regard de la thématique. Nous remercions donc cette revue et son directeur de la publication, Christian Huyghe, d'avoir autorisé la publication de cet article dans notre revue.

Revenons sur notre propre politique éditoriale concernant les droits d'auteurs. Les textes de la revue AE&S sont publiés sous la licence Creative Commons « BY-NC-ND » : les auteurs ne cèdent pas leurs droits à la revue ; les textes peuvent être repris et republiés par quiconque le souhaite sous réserve d'indiquer que le texte a été publié pour la première fois dans notre revue et en précisant bien entendu le titre du texte et le nom de tous ses auteurs (clause BY, « attribution »), de ne pas faire d'utilisation commerciale (clause NC, « non commercial ») et sans apporter de modification au texte (clause ND, « no derivative works »). L'intérêt de cette licence est de ne pas limiter la circulation des idées tout en prévenant les conséquences indésirables potentielles de cet accès libre. De plus, elle ne compromet pas la possibilité qu'ont les contributeurs de réutiliser tout ou partie de leur texte sous une autre forme, puisqu'ils conservent leurs droits d'auteurs.

Par ailleurs, depuis le précédent numéro, l'accès au dernier numéro publié de la revue sur le site de l'Afa est réservé aux seuls adhérents de l'Afa et ne passe en accès libre que lorsqu'un nouveau numéro est publié. L'idée est bien entendu d'inciter nos collègues agronomes à ne pas oublier d'adhérer à l'association, mais elle présente aussi le défaut de restreindre l'accès à ceux qui, n'étant pas agronomes, n'ont pas forcément vocation à adhérer à l'Afa, même s'ils sont les bienvenus. À l'issue d'une période d'essai, l'efficacité de cette mesure sera évaluée pour décider si elle mérite d'être reconduite. En tout état de cause, elle concerne notre politique éditoriale et ne vient en aucun cas restreindre le droit des auteurs à faire circuler leur article dès que celui-ci est paru dans la revue, puisqu'ils en ont conservé les droits.

Pour revenir au contenu de ce numéro, le travail effectué par son comité éditorial a abouti à construire un ensemble diversifié : du point de vue des angles traités (voir éditorial) ; du point de vue du type de texte : articles scientifiques (description et analyses de situations concrètes, élaborations plus théoriques), témoignages d'agriculteurs, point de vues et controverses ; du point de vue des contextes agricoles concrets dans lesquels les interactions variétés – systèmes de cultures sont décrites : pays du Nord ou du Sud, variétés issues de l'industrie semencière ou de sélection in situ. On notera néanmoins que les exemples impliquant la sélection participative nous sont venus essentiellement de pays du Sud. Nous n'avons par ailleurs pas cherché à traiter dans le cadre de ce numéro les aspects concernant l'évolution des droits de propriété sur les semences et des systèmes juridiques en vigueur, tout en étant conscients des controverses auxquels ils ont donné lieu dans les dernières années, particulièrement dans le contexte français. Ces questions peuvent néanmoins apparaître dans certains textes, comme facteur accompagnant, voire influençant l'évolution du lien variétés – système de culture.

Nous publions également un article qui nous a été proposé spontanément et qui ne fait pas partie de la thématique du numéro. Son contenu nous a semblé bien correspondre à l'esprit de la revue, au plus près des pratiques des agriculteurs, et nous avons décidé de le publier sans attendre de

l'insérer dans un prochain numéro thématique. Nous maintiendrons cet usage permettant une plus grande réactivité pour la diffusion des idées d'agronomes au fil de leur formalisation.

Nous remercions enfin tous ceux qui ont été partie prenante de ce numéro, membres de son comité éditorial, auteurs, relecteurs des articles et l'équipe de la chaîne éditoriale, Sophie Douhairie, Danielle Lanquetuit et Philippe Prévost.

Les relecteurs des textes du numéro :

Christophe Albaladejo, Alice Baux, Didier Bazile, Valentin Beauval, Marc Benoit, Philippe Brabant, Jacques Caneill, Jacques Chantereau, Thierry Doré, Henri Darmency, Yves François, Isabelle Godringer, Henri Hocdé, Benoit Jannequin, Marie-Hélène Jeuffroy, Jean-Marie Larcher, Jacques Le Gouis, Josiane Lorgeou, Francis Macary, Xavier Pinochet, Olivier Réchauchère, Mamy Soumaré, Patrice This, Guy Trébuil, Gilles Trouche, Anne-Sophie Voisin.

Variétés et systèmes de culture : quelle co-évolution ? Quelles implications pour l'agronomie et la génétique ?

Marie-Hélène JEUFFROY* - Didier BAZILE**
Valentin BEAUVAL***

Xavier PINOCHET**** - Thierry DORÉ*****

* INRA

** Cirad

*** Agronome, ancien agriculteur

**** CETIOM

***** AgroParisTech

Le raisonnement de l'évolution des systèmes de culture, fondé sur leur analyse et leur compréhension, est au cœur de l'agronomie. Il repose sur des connaissances relatives au fonctionnement des agro-écosystèmes, sur des méthodes pour concevoir des systèmes répondant à de nouveaux enjeux et de nouvelles attentes issues d'une diversité d'acteurs, ainsi que sur des outils pour piloter ces systèmes de culture en fonction d'objectifs variés. Ce raisonnement nécessite également l'évaluation des performances des systèmes de culture, permettant d'envisager leur insertion dans des systèmes à d'autres échelles (exploitation agricole, filières, territoires...). Il implique enfin de concevoir les politiques publiques susceptibles d'en infléchir ou d'en orienter les trajectoires d'évolution. Le choix variétal (qui suppose l'accès aux semences) est un élément essentiel des systèmes de culture.

Depuis l'après-guerre, l'évolution des variétés et celle des systèmes de culture se sont faites en synergie. Sur le plan variétal, la modernisation agricole dans les pays du Nord, aussi bien que la révolution verte dans les pays du Sud, ont reposé sur la diffusion de variétés à hauts rendements en grain, avec une sélection de leurs caractéristiques favorables à cet objectif (fréquemment réduction de la taille des plantes et augmentation du rapport grain sur paille en céréales, meilleure valorisation du rayonnement lumineux, etc.). Ces modes d'intensification de l'agriculture ont répondu aux objectifs d'accroissement de la production fixés dans les modèles d'agriculture conventionnelle d'Europe et d'Asie ou encore pour les plantations d'Afrique intertropicale, car ils allaient de pair avec des conditions pédoclimatiques favorables et une élimination des facteurs limitants (apports élevés d'intrants et, pour le riz irrigué, meilleure gestion de l'irrigation, etc.). A contrario, du fait de la persistance de facteurs biotiques et abiotiques limi-

tants et/ou d'une non adéquation avec les pratiques agricoles locales, le modèle agricole issu de la Révolution verte n'a pas fonctionné dans plusieurs zones semi-arides (zones céréalières non irriguées du Maghreb). Et en Afrique subsaharienne, ce modèle ne s'est développé que dans quelques

régions agricoles et presque exclusivement pour des cultures de rente.

En France, l'agriculture doit aujourd'hui faire face à des défis importants (économiques, écologiques et sociaux). En conséquence, les objectifs assignés aux systèmes de culture sont progressivement redéfinis en intégrant notamment des finalités de qualité renouvelées ou retrouvées, et progressivement davantage de finalités de nature environnementale (qu'il s'agisse de respect de normes comme celles relatives à la qualité de l'eau et à son utilisation raisonnée, à la préservation de la biodiversité, ou des services rendus par les agroécosystèmes). La sélection de variétés dont les qualités d'usage sont améliorées (par exemple valeur boulangère des blés) et plus tolérantes à certaines maladies constitue la première réponse donnée par les sélectionneurs à cette nouvelle demande sociétale. Les avancées récentes en biologie moléculaire et en génétique servent aujourd'hui ce renouveau de l'amélioration variétale. Une meilleure caractérisation des accessions des collections *ex situ* permet de cibler les recherches vers certains gènes d'intérêt et une sélection assistée par marqueurs permet au sélectionneur de gagner un grand nombre d'années pour sa sortie variétale.

Parallèlement, de nouveaux enjeux émergent, en particulier concernant la propriété intellectuelle. Ainsi le certificat d'obtention végétale (COV) tel qu'il était défini dans les années 1960 a progressivement dû évoluer sous l'influence du droit des brevets, lequel remet en cause le principe de libre accès pour les obtenteurs aux variétés existantes comme ressource génétique pour la création des futures variétés. Les évolutions juridiques du COV, surtout depuis 1991, apparaissent de nature à réduire le droit historique des agriculteurs de ressemer sans taxation une partie de leur production. A contrario, au niveau mondial, on notera que différents systèmes se mettent en place tant pour permettre l'accès aux ressources génétiques et à la dynamique évolutive des espèces cultivées pour la production agricole et l'innovation (différents types de catalogues de variétés, Open Source Seed License, etc.), que pour garantir un accès à des semences de qualité pour les paysans (cf. le Système FAO de Semences de qualité déclarée).

Par ailleurs, l'implication dans des programmes de sélection participative de chercheurs des centres de la recherche publique (Cirad, Inra, quelques centres internationaux) et d'organisations paysannes des pays concernés amène une nouvelle réflexion sur la construction collective des variétés et sur la structure génétique de celles-ci qui repose moins strictement sur les principes de distinction, homogénéité et stabilité, comme c'est le cas pour les variétés protégées par le COV. Enfin, un dernier élément du paysage mérite d'être mentionné : il s'agit de la menace qui pèse fortement sur la capacité de poursuivre des travaux de recherche en biotechnologies dans le domaine des semences en France. La contestation – voire la perturbation – de ces travaux par une partie de la société a amené une part croissante des laboratoires de recherche publique ou privée à ralentir ou arrêter leurs programmes, contrairement à ce qui se passe dans d'autres pays.

Ce nouveau contexte agricole, scientifique, sociétal, réglementaire, pose de nouvelles questions sur les évolutions conjointes à venir des variétés et des systèmes de culture. Ce numéro de la revue AES vise à illustrer les questionnements en cours. Notre objectif a été de réfléchir entre agronomes, généticiens et agriculteurs sur ces questions, en balayant la gamme des préoccupations qui peuvent être celles des différents métiers d'agronomes.

Une première série d'articles porte sur les objectifs de production, et l'apport des variétés face à la diversification de ces objectifs. Deux exemples, sur blé et tomate, permettent de discuter du renouvellement des objectifs de sélection en rapport avec celui des finalités des systèmes de culture, que beaucoup d'agriculteurs souhaitent plus résilients face à la fréquence croissante des aléas climatiques et aux changements climatiques en cours et à venir, et que beaucoup de citoyens souhaitent moins agressifs vis-à-vis de l'environnement et plus à même de fournir une alimentation saine et nutritive. Ils sont suivis par une série de quatre textes qui déclinent le point de vue de l'acteur du choix variétal (l'agriculteur), l'analyse des modes d'évaluation des performances des variétés, ainsi qu'une réflexion prospective sur les apports de la génétique face aux enjeux des productions végétales en France.

Le comportement des variétés est très variable dès que l'on change de situation de production. Quels degrés de liberté supplémentaires pour atteindre des objectifs sont-ils offerts par la meilleure connaissance de ce que sont les Interactions Génotype x Environnement ? Ces interactions GxE se déclinent aujourd'hui sur un plan technique par GxExConduite (IGEC) et par GxExSociété (IGES) pour davantage tenir compte de la diversité des pratiques agricoles. Les travaux sur les IGEC et les IGES se sont développés au cours des quinze dernières années. Ces interactions présentent-elles des limites biologiques, en particulier pour les espèces végétales dont les rendements plafonnent actuellement ? Quels avantages et inconvénients présentent leur prise en compte dans le choix des variétés et des systèmes de culture sur les plans techniques, sociaux, organisationnels, économiques, culturels ? Comment les dispositifs officiels d'inscription et d'évaluation variétale répondent-ils à la diversité des situations de production et des modes de conduite ? Ces questions sont abordées dans une deuxième série de trois articles, fondés sur des situations françaises et africaines.

Le raisonnement d'une plus grande diversité génétique à différentes échelles spatiales (parcelle, exploitation, territoire, pays) semble être un moyen d'amplifier, par des effets synergiques, ce que portent chacune des variétés (particulièrement dans le cadre des résistances aux maladies). Le raisonnement spatio-temporel de la diversité génétique offre-t-il des opportunités compatibles avec la gestion des systèmes de culture et des filières ? La gestion de la diversité génétique doit-elle, peut-elle, se limiter aux espèces végétales cultivées, ou doit-on gérer également la diversité végétale qui existe dans les espaces non agricoles, mais qui peut avoir des conséquences sur le fonctionnement des systèmes agricoles (exemple des habitats semi-naturels des auxiliaires) ? Quel nouveau regard est-il possible de porter sur la

biodiversité pour l'intégrer dans la conception et la gestion de nouvelles associations d'espèces ou de variétés en meilleure synergie avec leur environnement ? Une troisième série d'articles et de témoignages de ce numéro aborde ces questions de gestion spatiale des variétés.

Enfin, la dernière partie de ce numéro est consacrée à des modèles alternatifs d'amélioration des plantes. Elle s'ouvre sur deux analyses critiques¹ des conséquences agronomiques des biotechnologies utilisées en génétique. Puis sont décrites différentes initiatives et réflexions permettant d'ouvrir, via de nouvelles démarches d'amélioration des plantes, le choix variétal offert aux agriculteurs. En effet à des échelles locales, régionales et nationales, se développent des pratiques de sélection participative, qui peuvent être un moyen de mieux intégrer les savoirs locaux et les savoirs scientifiques dans la gestion dynamique d'une diversité génétique et de mieux répondre à des demandes locales non prises en compte par les programmes de sélection privés ou publics. Les variétés issues de ces pratiques de sélection permettent-elles une évolution des conduites des cultures ? Présentent-elles notamment une meilleure adaptation aux conditions climatiques dans lesquelles elles ont été sélectionnées ? Une meilleure résistance à des stress biotiques ou abiotiques ? Existe-t-il des limites spatiales et organisationnelles à une sélection participative, et à l'atteinte de ses objectifs ? Plusieurs exemples concrets sont décrits.

Une note de lecture relative à l'ouvrage de Rival et Lelang consacré à la culture du palmier à huile, ainsi qu'un texte hors thématique portant sur l'usage des « carnets de plaine » des agriculteurs comme source d'information pour traiter les questions de gestion des pesticides à l'échelle des bassins-versants complètent ce numéro.

¹ Nous n'avons pas reçu de contributions qui s'attacheraient à présenter de façon prospective les enjeux des biotechnologies les plus récentes. Il faudra sans doute y revenir dans un prochain numéro.

Objectifs de production et variétés

Variétés et itinéraires techniques du blé : une évolution vers la diversification

Arnaud GAUFFRETEAU¹ - Gilles CHARMET²
Marie-Hélène JEUFFROY¹
Jacques LE GOUIS² - Jean-Marc MEYNARD³
Bernard ROLLAND⁴

¹INRA - UMR Agronomie - INRA/AgroParisTech - Bâtiment EGER - 78850 - Thiverval-Grignon - E-mail : gauffret@grignon.inra.fr - jeuffroy@grignon.inra.fr

²INRA - UMR GDEC - 5 chemin de Beaulieu - 63039

Clermont-Ferrand Cedex 2 - E-mail :

gilles.charmet@clermont.inra - jlegouis@clermont.inra.fr

³INRA - UMR SADAPT - Bâtiment EGER - 78850 Thiverval-Grignon
E-mail : meynard@grignon.inra.fr

⁴INRA - UMR IGEPP - Domaine de la Motte - B.P. 35327 - 35653 - Le Rheu Cedex - E-mail : bernard.rolland@rennes.inra.fr

Résumé

Le blé tendre d'hiver est aujourd'hui la céréale la plus cultivée en France. Ce constat n'est pas sans lien avec les progrès importants qui ont eu lieu dans les soixante dernières années, aussi bien en ce qui concerne les techniques culturales que le progrès génétique. Concernant les premiers, après une période propice à l'intensification, dans la seconde moitié du XX^e siècle, dans le but d'accroître la production de la culture, de nouveaux enjeux sont apparus. Ils visent à réduire les impacts environnementaux de la culture, à améliorer la qualité technologique (qui s'était dégradée du fait de la primauté du rendement maximum), et à utiliser les intrants de manière parcimonieuse, ainsi que les ressources fossiles qui se raréfient.

La sélection a été partie prenante des évolutions depuis l'après-guerre. Dans la seconde moitié du XX^e siècle, on a d'abord observé un progrès très important dans les rendements. Puis, face à une dégradation de la qualité globale de la récolte française, notamment la concentration en protéines des grains, et face aux nouveaux enjeux de la production (rappelés ci-dessus), de nouveaux critères ont été davantage pris en compte, comme la résistance aux maladies d'abord, puis la qualité, avec des résultats sensibles sur les caractéristiques des variétés inscrites. Ces nouvelles caractéristiques ne sont toutefois pas toujours très bien valorisées au niveau de la production. Par ailleurs, les travaux sur la sélection de variétés économes en azote n'en sont qu'à leurs débuts et on peut s'attendre à des progrès significatifs dans les années qui viennent. Enfin, on a vu apparaître ces dix dernières années, des propositions intéressantes de variétés spécifiquement adaptées aux conditions d'agriculture biologique, en particulier panifiables même pour des grains à basses teneurs en protéines.

En vue d'optimiser l'efficacité d'utilisation des ressources, il apparaît de plus en plus nécessaire de mieux adapter le choix des variétés cultivées, et donc leur sélection, à la diversité des situations de production, valorisant ainsi les interactions Génotype-Environnement-Conduite, souvent fortes dans les essais.

Dans cet objectif, il apparaît nécessaire de compléter la caractérisation des variétés, en particulier sur leur aptitude à réagir face à des facteurs limitants attendus dans les systèmes moins artificialisés par un usage plus économe des intrants. Cette caractérisation variétale doit s'appuyer sur une caractérisation environnementale précise et rigoureuse des milieux de sélection et

d'évaluation variétale. Elle peut également bénéficier de l'usage de modèles dynamiques de culture, qui permettent d'alléger les suivis sur le terrain, sans toutefois les remplacer totalement.

En revanche, malgré une demande croissante, mais imprécise, concernant la qualité nutritionnelle (taux de gluten moindre, richesse et équilibre entre acides aminés des grains notamment), ce critère n'a été que rarement pris en compte en sélection, jusqu'ici.

En perspective, face au développement attendu de systèmes de culture plus agroécologiques, moins consommateurs en intrants, on s'interrogera sur les types variétaux à sélectionner pour ces systèmes et les méthodes de conception qui peuvent aider à les définir.

Mots clés

Variétés, systèmes de culture, interaction Génotype x Environnement.

Abstract

Winter wheat is currently the most widely cultivated cereal in France. This finding is due to the significant progress that has occurred in the last 60 years in both the cropping techniques and the genetic. After a dramatic intensification of agriculture in the second half of the twentieth century aiming at increasing crop production, new challenges have emerged. They consist in reducing the environmental impacts of crops, improving their quality and using more sparingly the inputs and fossil resources.

Plant breeding has contributed to those postwar evolutions of agriculture. Therefore, selection has first led to a very significant increase of the varietal yield in the second half of the twentieth century. Then, face to a deterioration of the overall quality of the French harvest, including grain protein content, and face to new challenges of production (mentioned above), new criteria were taken into account in selection, such as disease resistance and quality with significant impacts on the characteristics of the registered varieties. However, these new features of varieties are not always used at the production level. In addition, studies for selecting varieties consuming less nitrogen are just beginning and we can expect significant progress in the coming years. Finally, over the past decade, some interesting varieties have emerged specifically adapted to the conditions of organic farming and able to make bread at low protein content.

In order to optimize the efficiency of resource use, it is becoming increasingly necessary to better adapt the choice of varieties, and therefore their selection, to the diversity of production conditions. For this purpose, it is necessary to complete the characterization of varieties, especially their tolerance to limiting factors expected in cropping systems using less input. It entails to analyze the Genotype x Environment x Management practices interactions often important in the cultivar trials and to describe precisely the cropping environments by using measurements and crop models.

Finally, as the agroecological systems using less input are expected to develop in the coming year, the varietal ideotypes adapted to those systems and the method to design them will be discussed.

Keywords

Variety, cropping system, genotype by environment interaction.

Évolution des itinéraires techniques du blé

Après la 2^{nde} guerre mondiale, l'objectif de l'agriculture française était prioritairement l'accroissement de la production afin de garantir l'autonomie alimentaire du pays. Celui-ci a largement été atteint grâce à la mise au point et à l'utilisation massive d'intrants. C'est ainsi que, dans les années 1960-70, on a vu croître très rapidement le nombre d'homologations de produits phytosanitaires, permettant progressivement

une maîtrise de plus en plus grande des facteurs limitant la production (régulateurs de croissance, insecticides, fongicides, herbicides de pré et post-levée). À cette période, ces produits sont devenus un nouveau moyen de maîtrise de la production, rapidement adopté par les agriculteurs largement accompagnés par l'ensemble du dispositif de R&D. Sont alors apparues des stratégies d'application systématique à vocation sécuritaire, permettant de réduire la vigilance sur les résistances aux maladies et à la verse. De même, bien que l'amélioration du raisonnement de la fertilisation azotée (fractionnement - Coïc, 1956 ; méthode des bilans - Hébert, 1969) permette de maîtriser l'alimentation azotée des cultures, les excès d'azote n'étant plus pénalisés, grâce aux progrès dans la prévention de la verse (variétés courtes, régulateur de croissance), la fertilisation a explicitement visé une alimentation azotée non limitante souvent excédentaire, et la sélection n'a pas cherché à favoriser des variétés plus tolérantes à des nutriments azotés sub-optimales, ce qui s'est traduit par un progrès génétique plus lent à faible niveau d'azote (Le Gouis, 2011).

Vers la fin des années 1970, on a assisté à une intensification de la production et à une spécialisation des systèmes agricoles, permis par ces progrès techniques. Le rendement visé est alors le potentiel permis par le sol et le climat local : on cherche à maximiser l'interception de l'énergie lumineuse par des semis précoces, des densités élevées, une alimentation azotée non limitante pendant tout le cycle cultural. Ces trois caractéristiques de la conduite favorisent les maladies cryptogamiques, les adventices et les pucerons, et exigent une protection phytosanitaire soutenue et préventive. Elles augmentent également le risque de verse, systématisant le recours aux régulateurs de croissance, malgré l'utilisation de variétés sélectionnées courtes². Les produits systémiques et les stratégies de protection préventive se développent rapidement, conduisant à une expansion massive des stratégies d'application systématique. Les traitements phytosanitaires deviennent la clé de voûte des systèmes de culture dominants, permettant de choisir des variétés avant tout sur des critères de productivité en grains (Meynard et Girardin, 1991).

Ces évolutions dans les facteurs de maîtrise de la production, en parallèle de progrès importants dans la sélection (voir partie II), se traduisent par une augmentation spectaculaire du rendement du blé en France : on passe de 25 q/ha en moyenne en 1960 à 65 q/ha en 1990, avec un gain moyen de plus de 1.26 q/ha/an (Brancourt-Hulmel et al., 2003). Depuis le milieu des années 1990, en revanche, cette progression du rendement moyen national est fortement ralentie (Brisson et al., 2010).

La maîtrise croissante de l'usage des produits phytosanitaires par les agriculteurs leur permet également de simplifier leurs successions de cultures (Mignolet et al., 2012) : le raccourcissement des rotations accroît les populations d'adventices liées aux cultures dominantes de la rotation (ex. vulpin) et le risque de développement de maladies cryptogamiques (piétin-échaudage, piétin-verse) qui se conservent dans le sol ; l'homogénéisation des mosaïques paysagères favorise l'accroissement des populations de parasites aériens, et donc l'usage des pesticides (Schott et al., 2010)

et, combinée à une réduction des éléments semi-naturels des paysages (haies, bosquets) et à une augmentation de la taille des parcelles, tend à réduire les populations d'auxiliaires.

À partir des années 1990, la prise de conscience des impacts environnementaux négatifs de la production intensive se généralise : pollution des nappes phréatiques par les nitrates et les pesticides, pollution de l'air par les pesticides et les gaz à effet de serre, réduction de la biodiversité, attestant de la responsabilité de l'agriculture dans ces effets (MEA 2005). Se développent alors des outils d'aide à la décision, permettant de mieux raisonner les applications d'engrais et de pesticides, pour les rendre moins systématiques et les adapter à la situation agricole, ce qui aurait pu faire baisser les consommations. Mais, dans le même temps, le processus de spécialisation des systèmes agricoles s'est poursuivi. Par exemple en 2009, 17% des blés français sont cultivés derrière un blé et 8% des surfaces assolées sont en monoculture (Fuzeau et al., 2012), ce qui accroît la dépendance aux engrais azotés (réduction massive des surfaces de légumineuses à graines et fourragères) et aux produits phytosanitaires (raccourcissement des rotations). Ceci compensant cela, l'usage des produits phytosanitaires et des engrais azotés tend à se stabiliser, mais ne diminue pas.

Dans ces années 1990, des modes de production alternatifs sont étudiés et se développent chez des agriculteurs pionniers : variétés résistantes, associations variétales (de Vallavieille-Pope et al., 2004), associations d'espèces (Hauggaard-Nielsen & Jensen, 2001), successions diversifiées, itinéraires techniques à bas niveau d'intrants (Meynard, 1991, Loyce et al., 2012), aménagements paysagers pour la lutte biologique par conservation,... Cependant, ces alternatives techniques font l'objet d'une faible diffusion vers les agriculteurs (Meynard et al., 2010), beaucoup moins importante que les outils d'aide à la décision visant à améliorer le raisonnement des traitements phytosanitaires (Figure 1). Une des raisons est la difficile compatibilité de ces pratiques alternatives avec les exigences des filières qui se sont construites autour du paradigme des cultures 'intensives' : face au risque d'associations variétales composées de variétés non adaptées aux débouchés, les associations variétales de blé sont boudées par les meuniers qui préfèrent travailler des lots de variétés pures ou de mélanges constitués par les collecteurs de variétés qu'ils ont eux-mêmes choisies, et par les collecteurs, qui répercutent les exigences des meuniers ; les conduites à bas niveau d'intrants butent sur une réticence des collecteurs qui craignent une réduction des volumes de collecte affectant leur compétitivité économique (Meynard et al., 2010) ; l'allongement des rotations se heurte à une absence de débouchés des espèces de diversification (Meynard et al., 2013).

Entre les années 1985 et 2000, la baisse tendancielle de la teneur en protéines moyenne de la récolte de blés français, avec la valeur la plus faible jamais obtenue en France (autour de 10,7%) en 1998 (Jeuffroy et Oury, 2012), a conduit la filière à réagir, en agissant simultanément au niveau de la sélection et au niveau de la conduite de la culture. Concernant cette dernière, on observe un accroissement de la fréquence des apports d'engrais azoté « tardifs », favorable à l'augmentation de la teneur des grains en protéines : la proportion des parcelles dont la fertilisation azotée est frac-

² (entre 1980 et 2000, la proportion des variétés françaises inscrites contenant des gènes de nanisme est passée de 0 à 90% ; Trottet et Doussinault, 2002)

tionnée en 3 apports est passée de 26% en 1994 à 70% en 2001 puis 65% en 2011 (résultats issus des enquêtes « Pratiques culturales » 1994, 2001 et 2011 du Service de la Statistique et de la Prospective du Ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche, de la ruralité et de l'aménagement du territoire). Mais on ne connaît pas les conséquences de cette évolution sur la qualité nutritionnelle des grains. Aujourd'hui, des stratégies de fertilisation azotée innovantes (suppression du 1^{er} apport sortie hiver, modification des doses entre les 2^{ème} et 3^{ème} apports) ont montré expérimentalement la possibilité de favoriser la teneur en protéines des grains, sans affecter le rendement et en réduisant les pertes vers l'environnement (Jeuffroy et Oury, 2012 ; Jeuffroy et al., 2013). De même, des innovations techniques de rupture (associations variétales, associations d'espèces) favorisent ce critère de qualité.

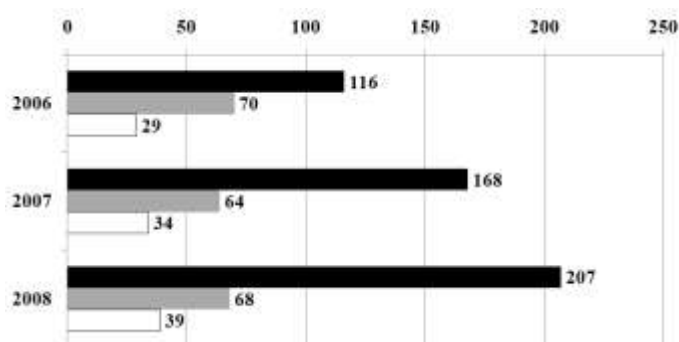


Figure 1 : Fréquence des articles de la presse agricole visant à promouvoir la réduction des pesticides par des outils d'aide au positionnement des traitements en noir ; par la substitution d'autres intrants (semences, énergie...), en gris ; ou par la reconception des systèmes de culture, en blanc (d'après Meynard et al., 2010)

Une évolution des cibles en amélioration variétale

La sélection variétale a, elle-aussi, été marquée par des évolutions spécifiques depuis l'après-guerre. Dans la seconde moitié du XX^{ème} siècle, les rendements ont augmenté en moyenne en France de 1.26 q ha⁻¹ an⁻¹. Classiquement, on estime qu'environ la moitié de cette augmentation est due à l'amélioration variétale et l'autre moitié à l'amélioration des techniques culturales. En effet, sur la période (1946-1992), Brancourt-Hulmel et al. (2003) ont estimé le progrès génétique moyen à 0.49 q ha⁻¹ an⁻¹. Comme nous l'avons signalé dans la première partie, cette augmentation de rendement s'est traduite par une diminution de la concentration en protéines du grain avec des répercussions possibles sur la qualité d'utilisation et les possibilités d'exportation. Par exemple, la force boulangère, qui avait fortement progressé depuis les années 1970 grâce à la sélection (voir ci-dessous), tend de nouveau à régresser avec la baisse de la teneur en protéines.

Face à cette variabilité de la qualité boulangère de la récolte française, et face aux nouveaux enjeux de la production, de nouveaux critères d'inscription, et donc de sélection, ont été davantage pris en compte. Dans les années 1980, le règlement technique a aussi évolué pour permettre une segmentation plus marquée de la qualité et les classes : blés panifiables supérieurs (BPS), blés panifiables courant (BPC) et blés pour d'autres usages (BAU) ont été introduites. On a assisté à une forte orientation de la sélection et de la pro-

duction vers les BPS, qui représentaient moins de la moitié des surfaces à la fin des années 1990, pour atteindre 80% en 2008 et se stabiliser autour de 70% maintenant (FranceAgriMer, 2013). Pour renverser la baisse de la concentration en protéines, il a été proposé d'introduire un nouveau critère en 2006 (Oury et Godin, 2007). Celui-ci est issu de l'observation, depuis très longtemps, d'une corrélation négative entre le rendement en grains et la concentration en protéines, quand différentes variétés sont comparées dans les mêmes conditions. En moyenne, une augmentation de rendement de 10 q ha⁻¹ se traduit par une baisse de la concentration en protéines de 1 point. Il a été proposé d'utiliser l'écart à cette relation négative (aussi nommé GPD pour « Grain Protein Deviation ») pour identifier les variétés plus riches en protéines, pour un niveau de rendement donné. Ainsi les variétés s'écartant positivement de cette relation obtiennent un bonus simple ou double à l'inscription, selon le niveau de leur écart à la régression moyenne. Depuis l'application de cette règle, une vingtaine de variétés ont profité de cette bonification. Enfin, plus récemment, deux variétés ont été inscrites en 2011 après une expérimentation VAT spéciale en conditions d'agriculture biologique. Ces deux variétés BPS se caractérisent par un maintien de la qualité en panification dans les situations d'agriculture biologique qui sont souvent caractérisées par des carences en azote durant une partie du cycle. Les lignées dont sont issues les variétés n'ont pas été spécifiquement sélectionnées dès le départ dans des conditions d'agriculture biologique mais elles proviennent du schéma de sélection INRA à bas niveau d'intrants dans lequel la densité de semis est réduite, les traitements fongicides et raccourcisseurs sont supprimés, et la quantité d'engrais azoté appliqué est significativement réduite.

La résistance aux principales maladies fongiques a été, depuis très longtemps, considérée comme un critère important de sélection. Lors de l'inscription, les essais servant à l'estimation du rendement sont conduits selon deux modalités, traitées et non traitées avec des fongicides, depuis le milieu des années 1980. Des bonifications et pénalités selon l'écart entre les rendements mesurés aux deux modalités ont été instaurées en 1990 et renforcés en 1994 (Boulineau et Leclerc, 2013). Cela s'est traduit par des résultats sensibles sur l'accroissement du niveau de résistance des variétés inscrites.

Ces nouvelles caractéristiques, particulièrement les résistances aux maladies, ne sont toutefois pas toujours très bien valorisées au niveau des conseils aux agriculteurs qui privilégient encore trop souvent une stratégie d'assurance par une couverture fongicide totale. La diffusion des variétés « rustiques » (Figure 2), multirésistantes aux maladies et à la verse et productives, est très dépendante du prix du blé et du verrouillage lié au conseil technique dominant (Butault et al., 2010).

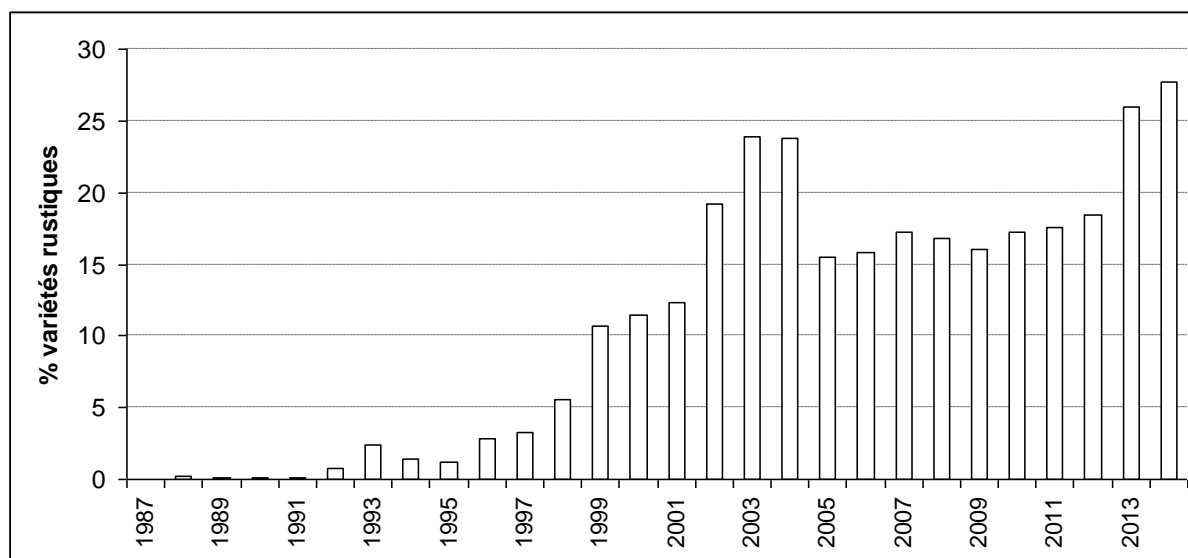


Figure 2 : Part estimée des variétés « rustiques » dans la multiplication de semences certifiées de blé tendre d'hiver en France

Les travaux sur la sélection de variétés économes en azote n'en sont qu'à leurs débuts. La fertilisation azotée est très consommatrice d'énergie (pour la production, le transport et l'application des engrais azotés). Elle est aussi à l'origine d'émissions de gaz à effet de serre. Enfin le prix de cet intrant a tendance, sur le moyen terme, à fortement augmenter en suivant les cours du gaz naturel. Il est donc nécessaire d'augmenter l'efficacité d'utilisation de l'azote qui est d'environ 25 kg de grain produits par ha et par kg d'azote disponible (Le Gouis, 2012). Des études ont montré l'existence d'une variabilité génétique pour l'efficacité d'absorption de l'azote et pour l'efficacité de sa conversion en grains. Mais cette variabilité a, jusqu'à présent, été peu exploitée du fait de la difficulté à bien quantifier ces différences et au coût élevé des expérimentations nécessaires pour les estimer. En effet, l'idéal est de pouvoir comparer les variétés à leur optimum de rendement, ce qui nécessite de tester plusieurs niveaux de fertilisation azotée pour avoir une gamme allant de situations limitantes en azote à des situations non limitantes. Néanmoins, le Comité Technique Permanent de la Sélection (CTPS) a lancé en 2013 une première série d'expérimentations destinées à tester les lignées en cours d'inscription à trois niveaux de fertilisation afin de juger de leur efficacité d'utilisation de l'azote. Les premiers résultats, qui seront complétés par une deuxième année d'expérimentation, sont en cours d'analyse pour valider la méthode et commencer à identifier des paramètres pertinents pour classer les variétés. Si un critère déterminant est identifié, celui-ci pourra être pris en compte dans les programmes de sélection, au moins dans la caractérisation des générations avancées et on pourra s'attendre à des progrès significatifs dans les années suivantes.

Les deux premières variétés, inscrites au catalogue officiel des variétés en 2012 après une expérimentation spéciale en agriculture biologique, se caractérisent par un rendement amélioré et par un fort GPD positif. À rendement supérieur de 10% au témoin Renan en AB, elles maintiennent ainsi un taux de protéines et une qualité boulangère satisfaisants, caractéristiques importantes car les systèmes de culture en AB sont très souvent fortement limitants en azote (Rolland et al. 2012). Dans les cinq prochaines années seront propo-

sées à l'inscription des lignées spécifiquement adaptées aux conditions d'agriculture biologique, en particulier compétitives vis-à-vis des adventices.

Parallèlement à des approches fondées sur la sélection au sein de la variabilité naturelle, des solutions de rupture à plus long terme sont explorées. C'est par exemple le cas d'une éventuelle possibilité de transférer chez le blé la capacité à fixer l'azote de l'air (Cullimore et al., 2013) comme chez certaines légumineuses. Dans ce système, la fixation de l'azote serait réalisée par une bactérie de type rhizobium qui est abritée dans un nodule racinaire et qui utilise une partie des sucres produits par la plante. Ces approches ont été relancées, car il a été montré que la symbiose chez les protéagineux repose sur la reconnaissance d'un signal bactérien (facteur Nod) qui est similaire au signal des symbioses mycorhiziennes (facteur Myc) présentes chez les céréales. L'interaction entre céréales et bactéries fixatrices d'N serait donc envisageable même si de nombreuses et difficiles étapes restent à franchir et si on peut attendre une diminution de rendement due à un surcoût énergétique pour la plante. Ces approches génétiques devront être développées en synergie avec des approches agronomiques complémentaires, pour limiter les pertes d'azote du sol (plantes de couverture hivernale, gestion du travail du sol...) et enrichir le sol en azote (augmentation des protéagineux dans les rotations, association pois-blé...). Car à elle seule, l'approche génétique qui vise à favoriser la fixation d'N atmosphérique par le blé tendre aurait sans nul doute pour conséquence d'accroître les surfaces cultivées en blé par rapport à d'autres cultures, et donc d'accroître les impacts environnementaux négatifs des systèmes de monoculture !

Analyse et valorisation des interactions Génotype x Environnement x Conduite (IGEC)

L'évolution des conditions climatiques et la diversification des modalités de la production agricole, et notamment le raccourcissement des successions d'une part, et la réduction des intrants d'autre part, génèrent des conditions de cultures de plus en plus hétérogènes. Ce nouveau cadre de production implique de disposer de variétés qui soient (i)

diversifiées et adaptées au large éventail des conditions biotiques et pédoclimatiques rencontrées en France, (ii) suffisamment caractérisées pour permettre à l'agriculteur d'opérer un choix optimal parmi le matériel disponible, au regard de ses objectifs et de ses contraintes techniques et environnementales. Les variétés de blé tendre sont actuellement caractérisées par leur rendement, leur qualité technologique, leur précocité, leur résistance aux maladies, à la verse et au gel. Cette caractérisation est partielle, elle devrait notamment être complétée par des résistances aux stress hydriques et azotés plus fréquents dans des conduites moins consommatrices en azote et en eau.

La sélection des variétés et leur caractérisation repose sur des réseaux d'essais variétaux (réseaux des obtenteurs, réseau d'inscription géré par le GEVES, réseaux de post-inscription gérés par les instituts techniques, les coopératives, les Chambres d'agriculture...). Ces réseaux cherchent à évaluer la valeur agronomique des variétés dans une gamme d'environnements cibles. Ils sont constitués par plusieurs campagnes, plusieurs sites d'expérimentation et plusieurs conduites culturales. Chaque année, des centaines d'essais variétaux sont conduits, ce qui représente un investissement considérable. Nous ferons dans cette partie un inventaire non exhaustif des analyses possibles pour valoriser les données issues de ces réseaux d'essais, certaines étant déjà largement pratiquées, d'autres beaucoup moins. Nous nous attacherons à décrire les informations nécessaires à la réalisation de ces analyses et la façon dont ces analyses peuvent orienter la sélection et enrichir le conseil. Nous illustrerons notre propos sur un jeu de données INRA présentant les rendements de 9 variétés testées dans 27 environnements, combinaisons de 2 années (2001 et 2002), 7 sites (CL : Clermont-Ferrand – 63, DI : Dijon – 21, LI : Lille – 59, LM : Le Moulon – 91, MO : Estrées-Mons – 80, RE : Rennes – 35 et TO : Toulouse – 31) et 3 conduites culturales (in = intensive, nr = fertilisation azotée réduite et nt = non traité aux fongicides).

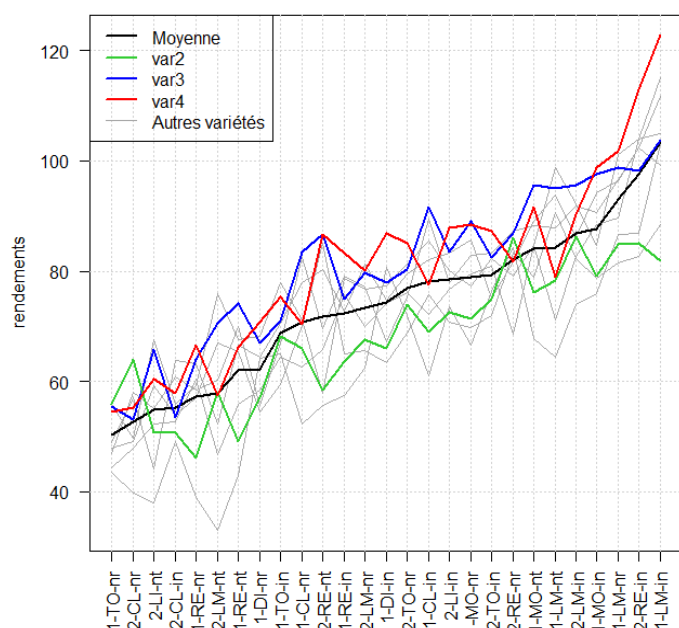


Figure 3 : Rendements observés sur 9 variétés et 27 environnements

Les variétés testées dans les réseaux d'essais sont évaluées en premier lieu sur leur performance moyenne. Cette information est à la base de l'évaluation traditionnelle des variétés et de leur inscription au catalogue national. Résumer la valeur agronomique des variétés par leurs performances moyennes revient à penser que la réponse des variétés aux différents environnements d'un réseau d'essais est identique. Or ces réponses diffèrent d'une variété à l'autre et peuvent conduire à des inversions de classements variétaux entre environnements visibles sur la figure 3. Lorsque ces inversions sont statistiquement significatives (c'est le cas dans notre exemple), elles révèlent des interactions entre variétés et environnements importantes au sein du réseau d'essais.

Il est commode d'exprimer la performance Y d'une variété i dans un environnement j (combinaison d'une année, d'un site et d'une conduite) et une répétition k de la façon suivante :

$$Y_{ijk} = \mu + V_i + E_j + V \times E_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad [1]$$

où $\mu + V_i$ est la performance moyenne de la variété i , E_j est la réponse moyenne des variétés à l'environnement j et $V \times E_{ij}$ est l'interaction entre la variété i et l'environnement j . Cette interaction mesure l'écart entre la réponse moyenne des variétés à l'environnement j et la réponse particulière de la variété i à ce même environnement.

Le niveau d'interaction d'une variété peut être mesuré par la somme de ses termes d'interaction élevés au carré, c'est son écovalence (Wricke, 1962). Les variétés de faible écovalence sont peu interactives. Elles sont qualifiées de stables selon le concept de stabilité dynamique (Becker et Léon, 1988) car l'écart entre leur performance et la performance moyenne des variétés testées ($V_i + V \times E_{ij}$) varie peu d'un environnement à l'autre dans le réseau d'essais. Les obtenteurs qui cherchent à sélectionner des variétés performantes sur une gamme d'environnements la plus large possible, tendent à privilégier les variétés généralistes à la fois performantes (V_i élevé) et peu interactives. Dans notre exemple, c'est le cas de la variété 3 qui présente la meilleure performance moyenne et la plus faible écovalence (table 1). La performance de cette variété est significativement supérieure à la moyenne dans 20 des 27 environnements étudiés et n'est jamais significativement inférieure à la moyenne. Pour une même performance moyenne, une variété interactive présente un plus grand risque de défaillance dans un environnement particulier qu'une variété peu interactive. Par exemple, la variété 4 qui présente la même performance moyenne que la variété 3 mais une écovalence plus forte (table 1), présente une performance significativement inférieure à la moyenne sur l'environnement 1-LM-nt (figure 3). Ce type de défaillance peut entraver le développement économique d'une variété.

Cependant, ne pas tenir compte des interactions s'exprimant dans les réseaux d'essais variétaux, ou chercher à les minimiser au cours des étapes de sélection et d'inscription, peut conduire à rejeter des variétés bien adaptées à des environnements particuliers, mais présentant des interactions fortes et une performance moyenne qui peut être inférieure à celle des témoins. C'est le cas par exemple de la variété 2 qui, malgré une très faible performance moyenne et une écovalence parmi les plus fortes (table 1),

présente un rendement significativement supérieur à la moyenne dans l'environnement 1-TO-nr et significativement supérieur à celui de toutes les autres variétés dans l'environnement 2-CL-nr, ces deux environnements étant les moins productifs du réseau (figure 3). De manière générale, on peut se demander si la stratégie de sélection actuelle à la recherche de variétés « passe partout » qui avait tout son sens dans le cas d'une agriculture intensive où l'hétérogénéité des conditions de culture était largement régulée par l'utilisation des intrants en préventif est encore valable dans un contexte de réduction des intrants tendant à la diversification des environnements de culture. C'est d'ailleurs en réaction à cette sélection centralisée orientant vers des variétés généralistes qu'est proposée la sélection participative avec l'objectif de disposer de variétés qui seraient mieux adaptées aux situations de production locales et aux attentes particulières de collectifs d'agriculteurs (Desclaux et al., 2008). Notons que si la sélection de variétés adaptées à des contextes de productions particuliers apparaît nécessaire dans un contexte de diversification des pratiques agricoles, ces variétés doivent être suffisamment stables pour tolérer les variations interannuelles des conditions de culture dues notamment aux aléas climatique et totalement imprédictibles avant semis.

Variétés	Moy	Eco
Var1	77.1	595
Var2	68.2	1092
Var3	80.6	574
Var4	80.6	819
Var5	78.0	1065
Var6	63.5	1591
Var7	69.9	1276
Var8	76.3	584
Var9	70.8	618

Table 1 : Performance moyenne (Moy en q/ha) et écovalences (Eco en q²/ha²) des variétés sur le réseau d'essais

Au cours des phases de post-inscription, les acteurs en charge du développement des variétés et du conseil aux utilisateurs cherchent à établir les spécificités adaptatives des variétés pour affiner leur positionnement dans les grandes zones de culture du blé. Par une analyse descriptive de la matrice d'interactions génotype x environnement (IGE) (figure 4), ils établissent les environnements de prédilection de chaque variété. Ils identifient ainsi, en plus des variétés généralistes peu interactives et adaptées à une large gamme d'environnements (variétés présentant des cercles de faibles rayons sur la figure 4), des variétés plus spécialisées adaptées à des environnements particuliers et présentant pour ces environnements des interactions VxE_{ij} positives (cercles noirs). Dans le cas de réseaux d'essais présentant un grand nombre d'environnements et de variétés, la matrice d'interactions est difficile à analyser directement. Il peut être utile de résumer son information par une analyse en composante principale préalable, ce que proposent les méthodes AMMI (Gauch, 1992) ou GGE biplot (Yan, 2001).

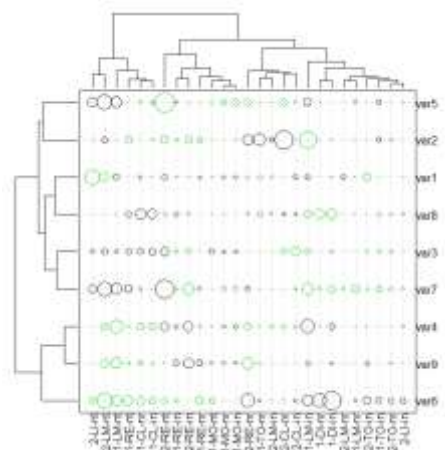


Figure 4 : Matrice d'interactions : les interactions positives sont en noir, les négatives en vert et le rayon du cercle est proportionnel à la valeur absolue de l'interaction. Les variétés et les environnements sont regroupés selon la proximité de leurs profils d'interactions

Les analyses descriptives précédemment décrites sont contingentes des réseaux d'essais sur lesquelles elles sont pratiquées. Elles ne permettent pas d'interpréter biologiquement les réponses variétales aux différents environnements et de prévoir les performances des variétés testées dans des environnements non expérimentés pour définir les contours de leurs potentiels adaptatifs. Pour pallier ce problème, Denis (1980, 1988) propose de décrire les environnements d'essais par des covariables environnementales et d'exprimer la réponse des variétés à chacun des environnements d'essais ($E_j + VxE_{ij}$ dans [1]) comme la somme des réponses variétales à chacune des covariables environnementales. Pour des raisons pratiques, nous pouvons décrire la réponse des variétés à une covariable environnementale cov^k comme la somme d'une réponse moyenne à cette covariable sur l'ensemble des variétés α^k et d'un écart à cette réponse moyenne pour chaque variété i β_i^k ($E_j + VxE_{ij} = \sum_k [(\alpha^k + \beta_i^k) \cdot cov_j^k]$). Plus tôt, Finlay et Wilkinson (1963) avaient déjà proposé de décrire chaque environnement d'un réseau d'essais par sa productivité moyenne sur l'ensemble des variétés ($cov_j = \mu + E_j$) et d'estimer la réponse des variétés à la productivité des environnements d'essais (modèle de régression conjointe). Ce type d'analyse très utilisé en sélection, permet de repérer les variétés valorisant mieux les environnements productifs ($\beta_i^k > 0$) ou au contraire capables de maintenir leur niveau de performance dans des milieux plus stressants ($\beta_i^k < 0$). Cependant, la part de l'interaction VxE expliquée par cette covariable est généralement faible (de l'ordre de 25% selon Brancourt et al, 1997). Dans notre exemple, elle n'explique que 11.4% de l'interaction VxE et seules 4 variétés présentent des paramètres β_i^k significativement différents de 0. Ceci s'explique par le fait que deux milieux de productivité équivalente peuvent présenter des conditions de cultures très différentes et ainsi générer des réponses variétales contrastées. S'appuyant sur des connaissances en agronomie et en écophysiologie, Lecomte (2005) propose de décrire les environnements d'essais par une série d'indicateurs quantifiant les principaux stress environnementaux (stress hydriques, gel, excès d'eau, stress azotés, maladies...) qui peuvent impacter le fonctionnement du blé durant ses principales phases de développement (levée, phase hivernale, tallage, montaison, remplissage). Dans ce cas, les paramètres β_i^k fournissent une esti-

mation de la tolérance des variétés à chacun des stress environnementaux (van Eeuwijk et al., 2004). Cette caractérisation des variétés est particulièrement utile pour le conseiller. Il peut prédire la réponse des variétés à des environnements non expérimentés à partir du niveau des différents stress environnementaux qui s'y expriment et ainsi mieux définir les contours de leurs potentiels adaptatifs. Les profils de résistances des variétés aux principaux stress environnementaux tels que présentés dans la figure 5 peuvent aussi aider le sélectionneur à affiner ses choix de croisements.

	Rouille brune	Stress azoté	Retard levée	Septoriose	Stress ravonnement	Gel
Var 4	-0.24	-0.11	0.18	1.8	-0.78	-0.37
Var 5	0.26	-0.23	0.62	-0.56	0.27	-0.88
Var 1	-0.24	0.18	-0.55	-0.72	-0.1	0.16
Var 3	1.31	0.38	-0.22	0.06	0.43	-0.8
Var 9	-0.98	-0.11	0.68	1.12	-0.23	-0.05
Var 8	0.63	0.42	0.04	2.08	0.68	0.11
Var 6	-2.99	-0.53	-0.6	2.32	-0.67	0.07
Var 7	2.66	1.2	-0.18	-0.58	0.26	0.48
Var 2	0.61	1.8	0.02	0.66	0.11	0.99

Figure 5 : Réponse différentielle des variétés (β^k_i) aux principaux stress s'exprimant dans le réseau d'essais. Les cases en rouge et en vert identifient les variétés respectivement plus sensibles et plus tolérantes que la moyenne à chaque stress. Les cases en orange identifient des variétés dont la réponse au stress n'est pas différente de la réponse moyenne des variétés.

Parallèlement à la décomposition de l'effet de l'environnement (E_j dans [1]) par une somme de covariables environnementales, une décomposition de l'effet génétique (V_i dans [1]) par des marqueurs génétiques (QTL) permet au généticien d'identifier les QTL ayant un effet sur les performances variétales quel que soit l'environnement (QTL généralistes) et ceux ayant un effet dépendant de l'environnement et expliquant une part d'interaction $V \times E$. L'intégration simultanée, dans les modèles, de covariables environnementales et génétiques permet d'identifier les allèles impliqués dans la réponse adaptative des variétés à un stress donné. Cette information peut être utilisée dans le processus de création variétale au travers de la sélection assistée par marqueurs.

Malgré leur intérêt potentiel, ces approches d'analyse de l'interaction $V \times E$, basées sur une meilleure explicitation des effets environnementaux et variétaux (E_j et V_i dans [1]) grâce à la prise en compte de covariables environnementales, d'effets alléliques révélés par certains marqueurs, et de leurs interactions, reste très peu pratiquées dans les réseaux d'essais variétaux. Ceci peut s'expliquer par le fait que jusqu'à présent, les modèles obtenus de cette façon restent peu prédictifs (Heslot, 2013). Des travaux sont en cours sur le sujet dans le cadre du GIS GC HP2E pour identifier et tester les causes possibles de cette faible qualité prédictive. Le coût supplémentaire qu'implique la caractérisation des essais peut aussi limiter la mise en œuvre de ces

approches. Le calcul des covariables environnementales nécessite en effet de réaliser dans les essais des observations visuelles (notes de verse, d'accidents, de maladies...), des mesures (données météorologiques journalières, principales caractéristiques du sol, mesures de stades phénologiques) et bien souvent des prélèvements (par exemple : prélèvement de plantes pour mesurer la teneur en azote à la floraison et déterminer l'indice de nutrition azotée). Ce travail, dont dépend la qualité des modèles établis, peut être fastidieux voire impossible dans le cas de prélèvements destructifs par exemple. Pour limiter le coût de cette description des environnements, des modèles agronomiques peuvent être utilisés pour décrire des facteurs limitants dont le contrôle visuel est très difficile à réaliser (par exemple : établissement du bilan hydrique et azoté d'une culture et identification des périodes de stress). L'utilisation croissante des modèles de culture doit permettre de gagner du temps et d'éviter certains prélèvements. Pour autant, ces modèles sont souvent imprécis (voir par exemple Houlès et al. (2004) dans le cas du modèle STICS) du fait notamment de leur paramétrage (Makowski et al., 2006), de l'exigence de qualité sur les variables d'entrée pour garantir des sorties précises, et de leur incomplétude. Il peut donc être intéressant de coupler ces modèles avec des mesures accessibles pour améliorer la qualité de leurs prédictions comme l'ont montré Naud et al. (2009) à partir du modèle Azodyn et de mesures SPAD pour la prédiction de l'INN entre la sortie de l'hiver et la floraison.

Perspectives

Le contexte de production du blé en France a beaucoup évolué ces dernières années avec, d'une part une diversification des attentes de la filière et de la société (satisfaction quantitative et qualitative des marchés, compétitivité économique aux différents maillons des filières, préservation de l'environnement, réduction des intrants...), et d'autre part une plus grande instabilité réglementaire, climatique et économique.

En réponse à ces évolutions, les critères de sélection des variétés se sont multipliés. D'abord sélectionnées pour leur productivité, puis sur la qualité de leurs grains (teneur en protéines, aptitude à la panification, poids spécifique...) et leur résistance aux maladies, les variétés sont aujourd'hui aussi sélectionnées sur leur comportement vis-à-vis de l'azote ou leur compétitivité vis-à-vis des adventices. La multiplication de ces critères de sélection n'est pas sans effet sur l'efficacité de la sélection puisqu'à investissement constant, une augmentation du nombre de critères de sélection entraîne une réduction du progrès sur chaque critère pris individuellement.

De plus, considérer simultanément tous ces critères de sélection à la recherche de variétés dites « passe-partout » adaptées à des attentes, des conduites culturales et des environnements de culture variés apparaît utopique. En effet, certains de ces critères de sélection sont antagonistes. Il existe par exemple une corrélation négative entre rendement et teneur en protéines (Oury et al., 2003). Il est également montré que les résistances des variétés aux maladies peuvent être coûteuses pour la plante et affecter leur rendement (Brown, 2002). Gauffreteau et al. (2009) ont quanti-

fié le coût sur le rendement d'une sélection pour la résistance aux maladies. Ils ont montré des différences de 5 q/ha en moyenne entre des variétés sensibles et des variétés multi-résistantes en l'absence de maladies dans les environnements de culture étudiés. Ces antagonismes entre caractéristiques variétales sont à la base des interactions entre variétés, environnement et conduites de cultures observées dans les réseaux d'essais variétaux. Ils conduisent à la nécessaire adaptation de la sélection et de la préconisation des variétés à leur contexte local de production et d'utilisation. Cela passe par une bonne caractérisation de ce contexte : contexte agronomique, environnemental, économique, écologique, social, réglementaire... Cela nécessite également d'éclairer les motivations et contraintes des différents acteurs de la filière de production. Cette première étape doit permettre d'identifier des situations homogènes d'usage des variétés (débouchés, pratiques culturales et conditions environnementales). Elle doit aussi s'attacher à identifier les marges de manœuvre existant tout au long de la filière de production pour pallier les défauts éventuels des variétés (pratiques culturales, procédés de stockage et de transformation des grains...) afin de ne pas faire porter à la seule variété toutes les attentes des différents acteurs de la filière. Ce travail doit permettre d'établir une liste parcimonieuse et hiérarchisée d'objectifs pour la variété dans le contexte de production préalablement défini.

Plutôt que de sélectionner directement sur ces objectifs qui peuvent être multiples et, pour certains, antagonistes, Donald (1968) propose de définir en amont de toute sélection un modèle de plante qualifié d'idéotype qui se focalise sur les caractéristiques clés de la plante lui permettant d'atteindre ces objectifs. Plus précisément, il s'agit de déterminer les caractéristiques morphologiques et physiologiques ou leurs déterminants génétiques qui permettent de répondre à chacun des objectifs et de les combiner au sein d'une plante de façon optimale en limitant les antagonismes entre caractéristiques et en favorisant leurs synergies (Debaeke, 2014). Une fois ces caractéristiques définies, ces idéotypes (combinaisons de caractéristiques) peuvent orienter la sélection et, dans certains cas, améliorer son efficacité, particulièrement durant les phases précoces où certains critères de sélection classiques comme le rendement ne sont pas encore mesurables. Dans le cas du riz, Peng *et al.* (2008) rapportent une augmentation de 8-15 % du rendement avec une sélection fondée sur des caractères morpho-physiologiques par rapport à la sélection classique fondée sur le rendement. Toutefois, cet exemple est assez isolé dans la littérature où les démonstrations concrètes de ce type sont rares. Il faut noter que ce type de démarche est souvent basé sur de la modélisation, qu'elle nécessite de mobiliser des connaissances scientifiques ou expertes dans différents domaines (agronomie, écophysiologie, pathologie, génétique...) et que sa réussite dépend largement de la qualité et de la complétude des connaissances et des modèles disponibles sur l'espèce étudiée. Elle reste cependant une voie très intéressante pour concevoir au travers d'une réflexion conceptuelle, collective et pluridisciplinaire des idéotypes très différents de ceux actuellement sélectionnés et qui pourraient être adaptés à des systèmes de culture en rupture avec ceux pratiqués aujourd'hui.

Parmi les différentes sources de variations des conditions de culture, les sources de variations répétables liées au type de sol au climat moyen ou à la conduite culturale doivent être distinguées des sources de variations interannuelles difficilement prédictibles avant semis comme les conditions météorologiques ou la pression de ravageurs par exemple. Si les variations répétables peuvent faire l'objet d'une sélection et d'un conseil variétal spécifique, les variations interannuelles imposent de disposer de variétés suffisamment stables. Cependant, plutôt que de rechercher des variétés capables de maintenir leur performance sur des années très contrastées en cumulant dans ces variétés des résistances à une diversité de stress environnementaux (froid, stress hydrique, hautes températures, maladies, insectes...), il peut être intéressant de préconiser, à l'échelle d'une exploitation agricole, des variétés aux profils de résistance contrastés. Mélanger des variétés au sein d'une même parcelle et profiter de synergies entre variétés est aussi une option intéressante notamment pour supporter les variations de pressions biotiques dans le milieu (Kear *et al.*, 2009). Dans ces cas aussi, la démarche d'idéotypage est intéressante car elle outille la réflexion sur les profils de variété à associer dans une exploitation ou à mélanger dans une parcelle.

Bibliographie

- Becker, H.C., Léon, J., 1988. Stability analysis in plant breeding. *Plant Breed* 101, 1-23
- Boulineau, F., Leclerc, C., 2013. Evolution des variétés au travers du catalogue officiel. *Le Sélectionneur Français* 64:35-50
- Brancourt-Hulmel, M., Biarnès-Dumoulin, V., Denis, J.B., 1997. Points de repère dans l'analyse de la stabilité et de l'interaction génotype - milieu en amélioration des plantes. *Agronomie* 17, 219-246
- Brancourt-Hulmel, M., Doussinault, G., Lecomte, C., Bérard, P., Le Buanec, B., Trottet, M., 2003. Genetic improvement of agronomic traits of winter wheat cultivars released in France from 1946 to 1992. *Crop Science* 43:37-45
- Brisson, N., Gate, P., Gouache, D., Charmet, G., Oury, F.X., Huard, F., 2010. Why are wheat yields stagnating in Europe? A Comprehensive data analysis for France. *Field Crops Research* 119, 201-212
- Brown, J. K.M., 2002. Yield penalties of disease resistance in crops. *Plant Biology*. 5:339-344
- Butault, J.P., Dedryver, C.A., Gary, C., Guichard, L., Jacquet, F., Meynard, J.M., Nicot, P., Pitrat, M., Reau, R., Sauphanor, B., Savini, I., Volay, T., 2010. Ecophyto R&D. Quelles voies pour réduire l'usage des pesticides ? Synthèse du rapport d'étude, INRA Editeur (France), 90 p
- Coïc, Y., 1956. Les besoins en azote du blé d'hiver, conséquences agronomiques. *Ann. Agron.* 7, 115-131
- Cullimore, J., *et al.*, 2013. Cereals benefiting from nitrogen fixation: strategies for the French public-private research community ; Position paper endorsed by the strategic committee of the GIS BV, the "Plant Biology and Biotechnologies" working group (GT4) of the AllEnvir Alliance

- Debaeke, P., Quilot-Turion, B., et al., 2014. Conception d'idéotypes de plantes pour une agriculture durable. *FormaScience INRA CIRAD*
- Denis, J.B., 1980. Analyse de régression factorielle. *Biom Praxim* 20, 1-34
- Denis, J.B., 1988. Two way analysis using covariates. *Statistics* 19, 123-132
- Desclaux, D., Nolot, J.M., Chiffolleau, Y., Gozé E., Leclerc, C., 2008. Changes in the concept of genotype \times environment interactions to fit agriculture diversification and decentralized participatory plant breeding: pluridisciplinary point of view. *Euphytica* 163, 533-546
- De Vallavieille-Pope, C., Mille, B., Belhaj Fraj, M., Meynard, J.-M., 2004. Intérêt des associations de variétés de blé pour diminuer les fongicides : conséquences sur la filière. *Le Sélectionneur Français*, 54, 45-56
- De Vallavieille-Pope, C., Belhaj Fraj, M., Mille B., Meynard, J.-M., 2006. Les associations de variétés : accroître la biodiversité pour mieux maîtriser les maladies Dossier de l'environnement de l'INRA n° 30, 101-109
- Donald, C.M., 1968. The breeding of crop ideotype. *Euphytica* 17, 385-403
- Finlay, K.W., Wilkinson, G.N., 1963. The analysis of adaptation in a plant-breeding programme. *Aust J Agric Res* 14, 742-754
- Fuzeau V., Dubois G., Théron O., Allaire G., 2012. Diversification des cultures dans l'agriculture française État des lieux et dispositifs d'accompagnement. *CGDD, Etudes et Documents*, n°67
- Gauch, H.G., 1992. Statistical analysis of regional yield trials: AMMI analysis of factorial designs. Elsevier, Amsterdam, the Netherlands; Chinese edition 2001, Caughina National Rice Research Institute, Hangzhou, China
- Gauffreteau, A., Marzouki, R., Jeuffroy, M.H., 2009. Does disease resistance have a cost in potential yield of winter bread wheat varieties? *Farming System Design Symposium* August 23-26, 2009 - Monterey. CA
- Hauggaard-Nielsen, H., Ambus, P. and Jensen, E.S., 2001. Interspecific competition, N use and interference with weeds in pea-barley intercropping. *Field Crops Res.* 70: 101-109
- Hébert J. (1969). La fumure azotée du blé tendre d'hiver. *Bull. Tech. Inf.* 244, 755-766
- Heslot, N., Akdemir, D., Sorrells, M. E., Jannink, J. L., 2013. Integrating environmental covariates and crop modeling into the genomic selection framework to predict genotype by environment interactions. *TAG* 127, 2, 463-480
- Houlès, V., Mary, B., Guérif, M., Makowski, D., Justes, E. 2004. Evaluation of the ability of the crop model STICS to recommend nitrogen fertilisation rates according to agro-environmental criteria. *Agronomie* 24, 339-349
- Jeuffroy, M.H., Gate, P., Machet, J.M., Recous, S., 2013. Gestion de l'azote en grandes cultures : les connaissances et outils disponibles permettent-ils de concilier exigences agronomiques et environnementales ? *Cahiers Agricultures* 22:249-257
- Jeuffroy, M.-H., Oury, F.X., 2012. Impact des nouvelles techniques de production, impliquant de faibles niveaux d'intrants, sur la quantité de protéines. *Innovations Agronomiques* 19:13-25
- Kiær, L. P., Skovgaard, I. M. & Østergård, H., 2009. Grain yield increase in cereal variety mixtures: A meta-analysis of field trials. *Field Crops Res.* 114, 361-373
- Lecomte, C., 2005. L'évaluation expérimentale des innovations variétales. Proposition d'outils d'analyse de l'interaction génotype - milieu adaptés à la diversité des besoins et des contraintes des acteurs de la filière semences. Thèse de Docteur-Ingénieur de l'INAPG, Paris (France), 174p. + annexes
- Le Gouis, J., 2011. Genetic improvement of nitrogen efficiency in wheat. In the Molecular and physiological basis of nutrient efficiency in crops. M.J. Hawkesford; Barraclough P [Ed.], Wiley & Sons, Inc., 123-1381
- Le Gouis, J., 2012. Quels caractères et quels outils pour améliorer l'efficacité d'utilisation de l'azote par le blé tendre ? *Le sélectionneur français* 63:37-46
- Loyce, C., Meynard, J.M., Bouchard, C., Rolland, B., Lonnet, P., Bataillon, P., Bernicot, M.H., Bonnefoy, M., Charrier, X., Debote, B., Demarquet, T., Duperrier, B., Félix, I., Heddadi, D., Leblanc, O., Leleu, M., Mangin, M., Méausoone, M., Doussinault, G., 2012. Growing winter wheat cultivars under different management intensities in France. A multicriteria assessment based on economic, energetic and environmental indicators. *Field Crops Research*, 125 (1), 167-178
- Makowski, D., Hillier, J., Wallach, D., Andrieu, B., Jeuffroy, M.H., 2006. Parameter estimation for crop models. In : Wallach D., Makowski D., Jones J.W. (Eds) *Working with Dynamic Crop Models*. Elsevier, Amsterdam, pp. 101-149
- Meynard, J.M., 1991. Pesticides et itinéraires techniques. In: P. Bye, C. Descoins and A. Deshayes (Editors), *Phytosanitaires, Protection des Plantes, Biopesticides*. INRA, Paris, pp. 85-100
- Meynard, J.M., Girardin, P., 1991. Produire autrement. *Le Courrier de l'Environnement*, 15
- Meynard, J.M., Barbier, J.M., Bonicel, L., Dubeuf, J.P., Guichard, L., Halska, J., Schmidt, A., 2010. *Ecophyto R&D. Tome VII, analyse des jeux d'acteurs*. 39p
- Mignolet C., Schott C., Benoît M., Meynard J.-M., 2012. Transformations des systèmes de production et des systèmes de culture du bassin de la Seine depuis les années 1970 : une spécialisation des territoires aux conséquences environnementales majeures. *Innovations Agronomiques* 22, 1-16
- Naud, C., Makowski, D., Jeuffroy, M.-H., 2009. Leaf transmittance measurements can improve predictions of the nitrogen status for winter wheat crop. *Field Crops Res.* 110, 27-34
- Oury, F.-X., Bérard, P., Brancourt-Hulmel, M., Depatureaux, C., Doussinault, G., Galic, N., Giraud, A., Heumez, E., Lecomte, C., Pluchard, P., Rolland, B., Rousset, M., Trotter,

M., 2003. Yield and grain protein concentration in bread wheat: a review and a study of multiannual data from a French breeding program. *J Genet Breed* 57:59-68

Oury, F.X., Godin, C., 2007. Yield and protein concentration in bread wheat: how to use the negative relationship between the two characters to identify favourable genotypes. *Euphytica*

Peng, S., Khush, G.S., Virk, P., Tang, Q., Zou, Y., 2008. Progress in ideotype breeding to increase rice yield potential. *Field Crop Res.* 108, 32-38

Rolland, B., Le Campion, A., Oury, F.X., 2012. Pourquoi sélectionner de nouvelles variétés de blé tendre adaptées à l'agriculture biologique ? *Courrier de l'Environnement de l'INRA* 62, 71-85

Schott, C., Mignolet, C., Meynard, J.M.. 2010. Les oléoprotéagineux dans les systèmes de culture : évolution des assolements et des successions culturales depuis les années 1970 dans le bassin de la Seine. *OCL Oléagineux Corps Gras Lipides* 17 (5), 276-291

Van Eeuwijk, F.A., Malosetti, M., Yin, X., Struik, P.C., Stam, P., 2004. Modelling differential phenotypic expression. In: "New discussions for a diverse planet", Proceedings of the 4th International Crop Science Congress, 26 Sep – 1 Oct 2004, Brisbane, Australia

Von Wricke, G., 1962. Über eine Methode zur Erfassung der ökologischen Streubreite in Feldversuchen. *Z Pflanzenzücht* 47, 92-96

Yan, W., 2001. GGEbiplot—A Windows application for graphical analysis of multi-environment trial data and other types of two-way data. *Agron. J.* 93:1111-1118.

Variétés et systèmes de culture de tomate : les apports conjoints de la génétique et de l'agronomie

François LECOMPTE* - Mathilde CAUSSE**

*UR1115 Plantes et Systèmes de culture Horticoles - INRA
Domaine Saint Paul - Site Agroparc - 84914 Avignon Cedex
9 - France

E-mail : francois.lecompte@avignon.inra.fr

**UR1052 - Unité de Génétique et Amélioration des Fruits
et Légumes - INRA - Domaine Saint-Maurice - 84143 Mont-
favet Cedex - France

E-mail : mathilde.causse@avignon.inra.fr

Résumé

La tomate est produite dans des conditions variées, du champ aux cultures hors-sol sous serre. Cette diversification a suivi l'évolution variétale et les innovations techniques des dernières décennies. Les variétés ont été acclimatées pour la culture sous abri tout au long de l'année. Des résistances variétales aux bioagresseurs ont été introgressées à partir des espèces sauvages. L'offre variétale a été perfectionnée pour aboutir aujourd'hui à une gamme permettant l'adaptation fine, sous serre, des conduites climatiques. La diversification variétale pour différents segments de marché est un objectif majeur des sélectionneurs. Les ruptures dans les systèmes de culture ont aussi été nombreuses, notamment la généralisation de la culture hors sol, le développement des outils de pilotage et la lutte biologique. Les évolutions rapides des méthodes d'amélioration des plantes, couplées au décryptage du génome de la tomate et à la modélisation, préfigurent des évolutions majeures des variétés et des systèmes de culture.

Mots-clés

Solanum lycopersicum, production, gène, rendement, qualité, techniques culturales.

Abstract

Tomatoes are produced in various conditions, ranging from the open field (mainly for processing tomatoes) to soilless greenhouses. This adaptation of cropping systems and the technological innovations that have accompanied it largely drove the evolution of varieties in recent decades. Varieties were acclimated to protected cultivation throughout the year. Varietal resistances to specific pests, adapted to the different conditions, were introduced from wild related species. In addition, varietal diversification for different markets, focusing on fruit size and shape, has emerged as a new breeding objective. However progress has been more limited for complex traits related to fruit quality or adaptation to abiotic stress. Yields and input efficiencies have also benefited from advances in agronomic sciences: nutrient recycling in soilless cultivation, fine tuning of the greenhouse climate or introduction of efficient biological control methods have characterized the recent evolution of

cropping systems. A more thorough understanding of genotype x environment interactions, which is of importance for plant resilience against stresses, and a better control of fruit flavour and nutritional quality, are major challenges for the scientific community. Rapid changes in plant breeding methods, the description of the tomato genome and enhanced capacities for crop modelling

foreshadow major developments in tomato varieties and cropping systems in the near future.

Key-words

Solanum lycopersicum, production, gene, yield, quality, cultural technics.

La tomate est une liane d'origine tropicale de la famille des Solanacées, appartenant au genre *Solanum* qui comprend plus de 1300 espèces. La plante produit des bouquets de fruits charnus toutes les trois feuilles, au cours d'une croissance naturellement indéterminée. La tomate est un fruit populaire qui s'est adapté à une consommation de masse, dans toutes les régions du monde. Sa culture a été accommodée à de nombreux climats, principalement en raison des possibilités offertes par la production sous serre. Deux grands types de production coexistent : la production de fruits frais, qui selon les régions est issue de serres, d'abris, ou de plein champ, et la production de fruits destinés à la transformation industrielle, essentiellement issue de cultures en plein champ. Quel que soit le mode de production, la culture est irriguée. Du fait de la taille du marché, l'amélioration génétique de la tomate constitue un enjeu commercial et industriel important, et le secteur semencier est très dynamique. D'autre part, la tomate, qui peut facilement être génétiquement transformée, est un modèle majeur en physiologie végétale. De nombreux caractères ont pu être améliorés et les variétés modernes associent productivité, résistances aux bioagresseurs, aux stress abiotiques, ainsi que certains critères de qualité liés à l'apparence et à la conservation. La segmentation des marchés et les difficultés techniques d'introgession de caractères complexes limitent cependant la rapidité de l'évolution variétale, alors que les sélectionneurs sont incités à proposer des variétés accumulant une somme toujours croissante de caractères d'intérêts. Les techniques culturales ont quant à elles largement évolué pour accompagner la segmentation de la production, mais aussi pour obtenir des résultats agronomiques complémentaires de ceux portés par l'amélioration génétique. L'objet de cet article est de dresser une vue d'ensemble des évolutions génétiques et agronomiques de la tomate ces dernières décennies et de proposer quelques pistes sur l'évolution possible des modes de production grâce au progrès génétique, en renvoyant les lecteurs qui souhaiteraient plus de détail aux nombreuses références bibliographiques citées.

Les principaux traits de l'évolution variétale aux XX^e et XXI^e siècles

Domestiquée par les populations indigènes d'Amérique, d'où la plante est issue, la tomate a fait l'objet d'une amélioration génétique continue au cours du XX^e siècle, permettant l'adaptation des variétés à tous les modes de production. La tomate est cultivée en plein champ, sous abri plastique ou en serre, en sol ou sur substrat artificiel, dans une large gamme de variation des facteurs de production : lumière, température, teneur en CO₂, eau et éléments minéraux. Le progrès génétique a pu être fortuit, avec par exemple la découverte de la mutation récessive sur le gène *self-pruning*, observée en 1914, donnant naissance aux variétés de tomates déterminées à récolte synchrone (Carmel-Goren et al., 2003). Cette caractéristique a été exploitée

pour la tomate d'industrie, et est à l'origine de progrès techniques déterminants, comme la récolte mécanique. Cependant, la majeure partie de l'amélioration variétale est le fruit de la domestication par l'homme, chaque décennie apportant au long du XX^e et du début du XXI^e siècle des évolutions génétiques majeures. Les principales d'entre elles peuvent être classées en trois catégories portant sur l'adaptation au milieu, la résistance aux bioagresseurs et le rendement et la qualité du fruit (tableau 1).

Années	Adaptation à des conditions de culture	Résistances aux bioagresseurs	Critères de Qualité
1950	Précocité de floraison	Verticilliose Fusariose Nématodes	Résistance à l'éclatement
1960	Abris - Hybrides F1	TMV	Forme Homogénéité du calibre
1970	Jours courts Froid	Cladosporiose	Couleur Fermeté
1980	Hors-sol	Fusariose racinaire	Conservation Uniformité de maturation
1990	Hors-sol Durée de culture	Pseudomonas TSWV	"Long life" Variétés grappe
2000	Diversification	TYLCV - Insectes	Segmentation

Tableau 1: Dates d'apparition des principales évolutions variétales de la tomate cultivée

L'adaptation des plantes à leur milieu a été permise par l'introduction de la précocité de floraison pour la production en primeur. La plante a également été adaptée aux jours courts pour la production en hiver, et au froid. Ainsi, la floraison continue de la plante a permis d'allonger le cycle de culture et de production à volonté, y compris durant les périodes froides et d'ensoleillement réduit.

La liste des résistances aux bioagresseurs - la tomate connaît plus de deux cents espèces nuisibles : champignons, virus, insectes, nématodes - n'a cessé de s'allonger depuis les années 1950. Des gènes R de résistance ont été découverts depuis cette époque contre tous les types de bioagresseurs, et introduits dans les variétés modernes. Ces gènes, principalement de la classe « Nucleotide binding site leucine-rich repeat proteins » (NBS-LRR) et généralement race-spécifique, déclenchent une cascade de réactions de défense dans la plante, notamment la réaction d'hypersensibilité, et permettent d'obtenir une résistance qualitative. Cependant l'adaptation des bioagresseurs constitue une menace perpétuelle pour la stabilité de ce type de résistances, une évolution génétique chez le bioagresseur pouvant compromettre leur efficacité. Dans le cas de la fusariose par exemple, causée par *Fusarium oxysporum*, les formes évoluent en races dont certaines peuvent s'avérer pathogènes sur une plante ne portant pas le gène R associé. À ce jour, trois R gènes (I-1, I-2 et I-3) efficaces contre les races 1, 2, et 3 de *F. oxysporum* ont été découverts chez la tomate (Simons et al., 1998). Des contextes similaires peuvent être décrits pour la résistance à *Verticillium dahliae* (conférée par un seul gène dominant Ve, codant pour un récepteur de surface) et à *Cladosporium fulvum* (Joosten and de Wit, 1999 ; Kawchuk et al., 2001). Le locus Mi confère à la tomate une résistance à plusieurs espèces de nématodes du genre *Meloidogyne* spp.

Plusieurs gènes homologues ont été décrits (Williamson and Kumar, 2006) mais seul le gène Mi-1 a été introduit dans les variétés de tomate dès 1940, et figure dans la plupart des cultivars modernes (Milligan et al., 1998 ; Williamson, 1998). Comparée à la résistance offerte par d'autres gènes, celle portée par Mi-1 est large : elle confère une résistance à de nombreuses espèces de nématodes, dont *Meloidogyne incognita*, *M. javanica* et *M. arenaria*. Le locus Mi confère également une résistance au puceron de la pomme de terre et à la mouche blanche *Bemisia tabaci* (Nombela et al., 2003). Comme avec les autres R-gènes, il a été observé dans de nombreuses régions du monde des isolats de nématodes virulent contre des tomates portant le gène Mi. Des études récentes indiquent que la virulence acquise contre des plantes portant le gène Mi est héritée de manière stable par des isolats s'étant développés sur des plantes sensibles. Mi présente des similarités avec le gène Pto, nécessaire à la résistance aux souches de la race o de *Pseudomonas syringae* pv tomato, agent causal de la moucheture de la tomate (Salmeron et al., 1996). Cette résistance, largement présente dans les variétés de tomate d'industrie, n'a remarquablement pas été contournée mais l'évolution rapide des souches de pathogène se traduit par des évolutions alléliques diminuant la réponse immune de la plante (Cai et al., 2011). Enfin, depuis les années 60 a été introduite la résistance au tobacco mosaic virus (TMV) (Hall, 1980), et plus récemment des résistances contre le virus de l'enroulement de la feuille (TYLCV) ou le virus de la maladie bronzée de la tomate (TSWV), ont fait leur apparition dans les variétés (Vidavsky and Czosnek, 1998). Beaucoup moins de progrès génétiques ont été réalisés concernant l'introduction de résistances contre les insectes (Foolad, 2007), et la lutte contre les ravageurs repose principalement sur des moyens chimiques ou physiques, ou des techniques de contrôle biologique. Tous les gènes de résistance à des bioagresseurs utilisés chez la tomate proviennent d'espèces apparentées collectées dans les années 1950 en Amérique du Sud et conservées dans des collections mises à la disposition de tous les chercheurs.

Le nombre et la taille des fruits, ainsi que la plupart des critères de qualité, sont des caractères hérités de manière quantitative. La sélection a essentiellement porté sur les caractères de taille, de forme, de couleur, de fermeté et de conservation, au détriment de la qualité organoleptique (voir plus loin). La taille et la forme du fruit sont des caractéristiques issues des premières phases de développement post anthèse, conséquences de processus de multiplication cellulaire puis d'endoréduplication et de grandissement des cellules. La phase de murissement débute après la croissance cellulaire, et implique des transformations chimiques et structurales qui déterminent l'arôme, la composition, la texture et la couleur. Environ 30 QTLs déterminent l'essentiel de la variation de la taille et de la forme des fruits, mais leurs effets sont d'inégale importance, et une grande partie de cette variabilité est contenue dans moins de dix loci répartis sur sept chromosomes (Tanksley, 2004). Dans quelques cas seulement, les gènes sous-jacents à ces QTL ont été identifiés (Rodriguez et al., 2011). À l'instar de ce qui a été observé pour d'autres fruits charnus, le principal objectif de la sélection de la tomate a été, et reste, la productivité et la stabilité du calibre. Cet effort, largement couronné

de succès, s'est décliné sur les différents segments de production constitués par les types variétaux : ronde, allongée, coeur de boeuf, etc... La forme du fruit, qui détermine l'appartenance à un de ces types, est contrôlée par quelques loci, dont les variations alléliques et les mutations ont permis de sélectionner des fruits de forme très variées. La tomate est un fruit climactérique, dont le murissement s'accompagne d'une respiration accrue et de la synthèse d'éthylène. Des mutations sur des gènes contrôlant le métabolisme de l'éthylène, sa synthèse, sa perception, ou la signalisation induite (entre autres dans les gènes *ripening inhibitor* (*rin*), *non ripening* (*nor*) ou *never ripe* (*Nr*)), conduisent à des fruits ne murissant pas (Moore et al., 2002 ; Giovannoni, 2007). La plupart de ces gènes sont récessifs : si les mutations sont homozygotes, le murissement est inhibé, tandis que les plantes hétérozygotes ont des fruits murissant lentement et présentant une longue durée de conservation. L'introduction dans les variétés modernes des gènes *rin* ou *nor*, ou, moins fréquente, d'autres gènes contrôlant le métabolisme de l'éthylène, est un des traits saillant de l'amélioration variétale de la tomate à la fin du XX^e siècle. Cependant, les cultivars ayant une longue tenue post-récolte sont fréquemment associés à une moindre qualité organoleptique (Causse et al., 2003). Enfin, les fruits ont été sélectionnés pour leur couleur. Celle-ci s'établit durant le murissement, et est essentiellement liée au contenu en caroténoïdes, lycopène, et dans une moindre mesure, β -carotène. Plusieurs mutants affectés pour la couleur des fruits ont été découverts, et utilisés dans les programmes de sélection. Pour ce qui concerne la tomate d'industrie, des caractères communs à la tomate de frais ont été sélectionnés, comme la taille des fruits et l'homogénéité des calibres. Mais une attention particulière a été portée au contenu en solides solubles (TSS ou °Brix), à la taille des plantes, la synchronisation de la floraison, ainsi qu'au taux de récolte (*harvest index*) (Grandillo et al., 1999 ; Foolad, 2007).

Du point de vue de l'industrie des semences et des plants, deux faits marquants caractérisent l'évolution de la production de tomate ce dernier demi-siècle. Le premier est concomitant de la généralisation du commerce des variétés par les sociétés semencières, conduisant au développement des hybrides F1. Ces hybrides combinent les caractéristiques des deux parents ainsi qu'un effet modéré d'hétérosis. Comme les caractères ségrégent ensuite dans la descendance, les utilisateurs de ces semences sont encouragés à racheter chaque année de nouvelles graines, ce qui assure la rentabilité du marché et des investissements dans l'amélioration des variétés. Les avantages comparatifs de ces variétés hybrides par rapport à celles obtenues par pollinisation ouverte sont cependant importants, et désormais toutes les variétés destinées au marché de frais, ainsi qu'une bonne partie de celles destinées à l'industrie, sont des hybrides (Bai and Lindhout, 2007). L'autre point marquant est la généralisation, plus récente, du greffage. Initialement, le greffage a été développé pour introduire dans le porte-greffe des résistances contre certaines maladies telluriques, notamment les maladies vasculaires comme la fusariose ou la verticilliose. Mais la sélection des porte-greffe a vite inclus des caractères de vigueur, importants pour les cultures longues sous serre (King et al., 2010). Plus récemment, le greffage s'est développé pour apporter un meilleur comportement des greff-

fons face aux stress abiotiques, températures basses ou élevées, présence de métaux lourds, et surtout résistance à la sécheresse et aux stress salins (Estan et al., 2005 ; Roupahel et al., 2010).

Une base génétique limitée de l'espèce domestiquée, et de nombreuses ressources issues des espèces sauvages

La variabilité génétique au sein de l'espèce *Solanum lycopersicum* est limitée, du fait de plusieurs goulots d'étranglement durant la domestication et l'évolution des cultivars modernes, et l'on estime qu'environ 5% seulement de la variabilité génétique totale du genre *Solanum* est trouvée chez la tomate cultivée (Miller and Tanksley, 1990). En conséquence, une grande partie des caractères décrits ci-dessus, et introduits dans les variétés de *S. lycopersicum*, est issue des espèces sauvages apparentées (Figure 1). Celles-ci sont au nombre de 8 : *S. pimpinellifolium*, *S. cheesmaniae*, *S. peruvianum*, *S. chmiewelskii*, *S. nerickii*, *S. chilense*, *S. habrochaites* et *S. pennellii*. Ces espèces sont réparties en deux groupes ou complexes, fonction des possibilités de croisements interspécifiques. *S. chilense* et *S. peruvianum* appartiennent au complexe *peruvianum*, et se croisent très difficilement avec la tomate cultivée, contrairement aux autres espèces, qui appartiennent au complexe *esculentum* et peuvent se croiser. L'hybridation avec des espèces du complexe *peruvianum* est cependant possible par des techniques de cultures d'embryons (Foolad, 2007).

Le recours aux espèces sauvages a été particulièrement important pour l'obtention des résistances aux bioagresseurs. Ainsi par exemple, *S. pimpinellifolium* (sans doute l'espèce sauvage dont est issue la tomate cultivée) a fourni des ressources pour l'introduction de résistances à *Pseudomonas syringae*, *Ralstonia solanacearum*, *Alternaria solani*, *Fusarium oxysporum* et *Cladosporium fulvum*. L'ensemble des résistances aux nématodes a été introduit à partir de croisements avec *S. peruvianum*, qui a également fourni des ressources génétiques contre *Pyrenocheta lycopersici*, la fusariose des racines (*Fusarium oxysporum* f.sp. *radicis lycopersici*), et *Clavibacter michiganensis*. Quant aux résistances contre les virus, elles ont été introduites notamment à partir de *S. habrochaites* (plusieurs potyvirus, TYLCV, TMV). La sélection assistée par marqueurs, qui s'est développée depuis les années 1990 est devenue généralisée, permettant d'accumuler des gènes d'intérêts dans les nouvelles variétés. Une variété hybride moderne contient par exemple entre cinq et dix gènes de résistance aux bioagresseurs.



Figure 1: Exemples d'espèces sauvages apparentées à *S. lycopersicum*. A: *S. pimpinellifolium*; B: *S. cheesmaniae*; C: *S. habrochaites*; D: *S. pennellii*.

Les caractères d'adaptation au milieu ont également été identifiés, et pour certains introduits chez *S. lycopersicum* à partir des espèces sauvages. Chez *S. lycopersicum*, la variabilité intraspécifique relative à l'adaptation aux basses températures est assez faible (Miltau *et al.*, 1986). En revanche, plusieurs espèces sauvages se développent naturellement en altitude, et l'adaptation au froid a pu être introduite à partir de *S. pennellii* ou *S. habrochaites*. Certains caractères peuvent être introduits via les porte-greffes. Par exemple, une variété moderne greffée sur un porte-greffe de *S. habrochaites* présente une meilleure adaptation aux températures froides qu'un assemblage *S. lycopersicum* * *S. lycopersicum*, du fait d'un meilleur fonctionnement du système racinaire (Venema *et al.*, 2008). Certains caractères d'adaptation à la sécheresse ont été trouvés chez *S. pennellii* et *S. chilense*. Ces espèces sauvages, adaptées aux milieux désertiques, présentent une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau (Water Use Efficiency ou WUE). On observe néanmoins une corrélation négative entre le WUE et le poids sec des plantes (Martin *et al.*, 1989 ; Xu *et al.*, 2008), qui obère les possibilités d'amélioration du WUE dans les variétés modernes. Par ailleurs, l'intérêt du WUE dans la sélection pour des plantes résistantes à la sécheresse a été questionné (Blum, 2009). Concernant le stress salin, des caractéristiques d'adaptation ont été identifiées chez *S. cheesmaniae* et plusieurs autres espèces sauvages (Cuartero and Fernandez-Munoz, 1999).

Les choix de la sélection, et les limites des variétés modernes

La productivité reste le critère principal d'amélioration de la tomate. Le progrès génétique a indéniablement contribué à l'augmentation continue des rendements depuis les années 1960-70, que ce soit en tomate de frais ou en tomate d'industrie. Les rendements moyens en tomate cultivée

sous serre sont passés, dans le nord de l'Europe (Pays Bas, Angleterre, France) de 100 t.ha⁻¹ dans les années 1970 à plus de 500 t.ha⁻¹ à la fin des années 2000 (van der Ploeg *et al.*, 2007), avec de nos jours des maximum de 800 t.ha⁻¹ dans certaines conditions de production, soit une progression supérieure à 5% par an, ce qui est considérable. Ce gain de productivité est, pour une part significative, lié à l'allongement des cycles de culture sous serre, qui durent désormais 11 mois, et à l'optimisation des techniques de culture (voir plus bas). On estime cependant que le potentiel de rendement des cultivars modernes est d'environ 40% plus élevé que celui des variétés produites dans les années 1950 (van der Ploeg *et al.*, 2007), soit un progrès génétique d'environ 1% par an. C'est principalement la taille des fruits et la stabilité du calibre qui ont été augmentées, le nombre de fruits par plante étant resté stable. Plusieurs caractères morphologiques et physiologiques sont en jeu, mais une partie de l'amélioration est due à la plus forte production de matière sèche des cultivars modernes, du fait d'une meilleure efficacité d'interception de la lumière et d'une photosynthèse nette plus élevée. En tomate d'industrie, les rendements ont doublé en 50 ans aux Etats-Unis (Barrios-Masias and Jackson, 2014), passant de 40 t.ha⁻¹ à 80-90 t.ha⁻¹ de rendement commercialisable moyen, et peuvent dans certaines conditions dépasser 100t/ha. Des rendements supérieurs à 100 t.ha⁻¹ sont aussi observés en Italie (Elia and Conversa, 2012), dont la majeure partie de la production est destinée à l'industrie. Le progrès génétique sur le rendement durant le dernier quart du XXe siècle a été de l'ordre de 1.5% par an pour les variétés d'industrie aux Etats-Unis et de 0.4% par an en Israël (Grandillo *et al.*, 1999), l'introduction des variétés hybrides ayant contribué pour environ un tiers à ce progrès. La part de la génétique dans l'augmentation des rendements est estimée à 19% en Israël, et 67% aux Etats-Unis, ces différences s'expliquant notamment par des rendements moyens plus élevés en Israël durant la période.

Les rendements observés dans les autres zones de production de tomate dépendent largement du mode de production et de la durée du cycle de culture. En culture en frais de cinq à six mois en sol sous abri non chauffé, on observe des rendements comparables de 120-170 t.ha⁻¹ en France, en Espagne, et en Turquie (Kirda et al., 2004 ; Lecompte, 2012 ; Thompson et al., 2013). En Chine, dans les typiques serres "bioclimatiques" qui couvrent plusieurs centaines de milliers d'hectares, les rendements pour des cycles de durée similaire sont de 70-100 t.ha⁻¹ (He et al., 2007). L'augmentation de productivité en culture en sol est plus faible qu'en serre hors sol, et il n'existe pas à notre connaissance d'études permettant d'évaluer la part de la génétique dans cette progression. Actuellement, la production par unité de temps et de surface est environ une fois et demi à deux fois plus faible en abri froid en sol qu'en serre hors-sol (Gravel et al., 2010). Une partie de cette meilleure productivité est probablement due à un meilleur indice de récolte en serre hors-sol, dans la mesure où la culture de gros fruits, typique de la culture hors-sol, est à même d'augmenter l'indice de récolte (Ho, 1996).

La diversification des types variétaux a été importante ces dernières années, avec le développement des types cerise, coeur de boeuf et allongées. L'amélioration génétique sur ces types variétaux s'est, au-delà du caractère de productivité, beaucoup portée sur les caractères de résistance et de conservation des fruits. Quel que soit le segment de production, la qualité organoleptique des fruits a été pendant longtemps délaissée par la sélection variétale (Beckles, 2012). La qualité organoleptique repose sur plusieurs critères (Causse et al., 2003), ayant trait au goût et au caractère sucré ou acide du fruit, que l'on peut relier à son contenu en sucres et acides ; aux arômes, qui dépendent du contenu en composés volatils ; à la texture (fermeté, farinosité, jutosité) qui dépend de nombreux critères dont la taille du fruit, son contenu en eau, son degré de maturation, l'épaisseur de la peau, les agencements cellulaires... À cette qualité organoleptique s'ajoute la qualité nutritionnelle, notamment la teneur en antioxydants et en acide ascorbique. Plusieurs raisons peuvent expliquer l'absence de sélection pour la qualité organoleptique ces dernières décennies, mais la principale est probablement la relation négative observée entre rendement et qualité, notamment la corrélation négative observée entre poids frais des fruits et teneur en éléments solubles (Tanksley et al., 1996 ; Fulton et al., 1997 ; Grandillo et al., 1999 ; Causse et al., 2003). Il existe une variabilité génétique significative pour la teneur en solides solubles totaux (TSS), celle-ci pouvant s'étendre de 3% à plus de 10% dans les variétés à petits fruits type tomate cerise (Balibrea et al., 2006 ; Beckles, 2012). Le contrôle génétique de la teneur en matière sèche est au moins autant déterminé par des QTL liés à l'accumulation d'eau dans les fruits qu'à des gènes contrôlant l'importation de sucres (Bertin et al., 2009), et la sélection pour le calibre des fruits a pu encourager le développement de variétés accumulant de grandes quantités d'eau dans leurs fruits. Les évolutions des modes de commercialisation, en particulier les distances entre bassin de production et de consommation, ont également abouti à des récoltes de fruits ayant un degré de mûrissement moindre, empêchant l'importation de saccharose dans les fruits jusqu'à maturité complète. La production

d'arômes se poursuit également tardivement sur la plante, mais elle est stoppée à la récolte, en particulier lors de la conservation au froid. Suite à des plaintes répétées des consommateurs, la sélection a néanmoins pris conscience de la nécessité d'une amélioration de la qualité organoleptique et nutritionnelle, surtout depuis les années 2000. La difficulté repose sur la nature polygénique de la plupart des caractères impliqués, puisqu'on dénombre par exemple 23 QTL pour le contenu en TSS (Fridman et al., 2000). D'autre part, le contrôle environnemental de ces caractères est fort, résultant en des interactions génotype x environnement complexes à identifier et à maîtriser.

Un autre enjeu pour la sélection variétale contemporaine est l'introduction de résistances variétales dans des situations où ces résistances sont de nature quantitative et à déterminisme polygénique. C'est le cas notamment pour le champignon nécrotrophe *Botrytis cinerea*, qui est un bioagresseur majeur de la tomate produite sous serre et abri. Dix QTL conférant une résistance partielle à *B. cinerea* ont été identifiés à partir de lignées quasi isogéniques issues de croisements entre *S. lycopersicum* et *S. habrochaites* (Finkers et al., 2007), et ces QTLs ont été retrouvés chez d'autres espèces sauvages apparentées (Davis et al., 2009). La résistance est croissante avec le nombre de QTLs présents chez un individu, suivant un modèle additif, ce qui ne rend pas facile un éventuel travail de sélection pour cette résistance. Une difficulté se pose également lorsque la durabilité d'un gène de résistance quantitative est liée au fond génétique dans lequel cette résistance est introgressée. La lutte contre le mildiou, causé par *Phytophthora infestans*, tient principalement à l'utilisation de gènes majeurs, dont le nombre est limité, et dont l'utilité est plus ou moins condamnée à moyen terme du fait de la forte capacité d'évolution du champignon et de contournement de ces gènes de résistance (Fry, 2008). Une plus grande durabilité de la résistance pourrait survenir de l'introduction de ces gènes R dans un fond génétique contenant d'autres loci conférant une résistance partielle (Andrion, 2009). Si certaines de ces résistances partielles ont d'ores et déjà été identifiées (Brouwer et al., 2004 ; Li et al., 2011), leur introduction dans du matériel végétal commercialisé n'est pas à l'ordre du jour, probablement du fait des difficultés techniques et de la faible rentabilité à court terme de ce type de programmes de sélection. La résistance à *Ralstonia solanacearum*, agent bactérien causant des dégâts majeurs dans les cultures de tomate des régions tropicales et sub-tropicales, est également à déterminisme polygénique (Thoquet et al., 1996). Il s'agit en fait d'une tolérance, puisque tous les cultivars, même les moins sensibles, accumulent des colonies bactériennes dans leur système racinaire, et que les symptômes observés chez dépendent des conditions environnementales (Lebeau et al., 2011). Par ailleurs, la complexité phylogénétique de *R. solanacearum* complique l'obtention de matériel résistant dans la mesure où l'activité des QTLs identifiés dans la tolérance dépendent des races testées (Carmeille et al., 2006). La lutte contre cette maladie repose dans l'état actuel des connaissances sur une complémentarité entre les résistances génétiques et d'autres méthodes de défense.

Les progrès des techniques culturales : quelles évolutions au-delà de l'accompagnement du progrès génétique ?

Les techniques de culture ont indéniablement accompagné l'évolution des variétés, avec des spécificités propres à chaque mode de production. La recherche de productivité ayant, on l'a vu, guidé l'évolution de la culture de la tomate ces dernières décennies, de nombreux travaux agronomiques ont porté sur les moyens d'atteindre le potentiel de production permis par la plante. Sans surprise, ces travaux portent sur l'environnement des cultures et la maîtrise des facteurs de production. Et c'est sous serre, où la maîtrise des conditions environnementales est la meilleure, que les évolutions agronomiques ont été les plus importantes. La plupart des changements sont intervenus entre les années 1970 et les années 1990, avec l'introduction successive du chauffage, de l'enrichissement de l'air en CO₂, de la culture hydroponique sur substrat, et enfin l'apport de lumière supplémentaire (Ho, 1998). Le chauffage a été déterminant dans l'évolution de la culture de la tomate, car malgré l'introduction de caractères d'adaptation au froid et aux jours courts, la tomate reste une espèce sensible à la température, avec un optimum de croissance entre 23 et 25°C. Si la plante peut intégrer des variations de température sans trop affecter la répartition de sa biomasse, le temps de développement du fruit est en revanche rallongé de manière importante lorsque la température diminue, avec une forte influence négative sur le rendement (Adams *et al.*, 2001). À l'inverse, des températures élevées perturbent la nouaison et diminuent le nombre de fruits (Picken, 1984). Une conduite thermique fine est donc nécessaire pour maintenir un rendement élevé pendant une longue période, ce qui est l'objectif en culture sous serre. Au chauffage l'hiver succèdent des dispositifs de contrôle de l'aération (naturelle ou forcée), de refroidissement par *cooling*, et d'ombrage ou de blanchiment des serres en été. Pour maximiser la production, il est nécessaire d'augmenter la photosynthèse nette de la plante, via un quasi doublement de la concentration en CO₂ dans l'air par rapport à sa concentration naturelle, et un apport de lumière supplémentaire, notamment aux latitudes élevées, et lorsque la photopériode est inférieure à l'optimum, qui est de 14h pour la tomate (Demers *et al.*, 1998). La recherche des meilleures configurations des différents types de serres et d'abri plastique, notamment vis-à-vis de leur aération, a été un souci constant des dernières décennies (Boulard *et al.*, 1997), et a accompagné des évolutions majeures, comme l'allongement de la hauteur sous chéneaux et l'apparition des filets anti-insectes (Fatnassi *et al.*, 2006). Les coûts énergétiques induits par la maîtrise du climat sous serre restent cependant élevés, et constituent l'essentiel des besoins totaux en énergie - ainsi que l'essentiel des impacts environnementaux - estimés par analyse en cycle de vie à environ 30 MJ/kg de tomate produit, en Hollande comme en France (Boulard *et al.*, 2011 ; Anton *et al.*, 2012). Ce bilan est en constante amélioration, du fait de l'augmentation de la production par m² de serre, mais aussi des technologies disponibles. Le développement de serres semi-fermées, plus efficaces énergétiquement, est rapide, tandis que des perspectives de serres totalement closes se dessinent (Montero *et al.*, 2009). Les producteurs serristes sont

très demandeurs de techniques, mais aussi de variétés, permettant de diminuer les coûts énergétiques. Les productions en sol, sous abri non chauffé, sont quant à elles beaucoup moins énergivores : environ 5 MJ/kg de tomate. La conduite de la plante a également évolué avec l'évolution des variétés et du greffage. La conduite vise en premier lieu à veiller à un bon équilibre entre production végétative et production fructifère. Un déséquilibre sources/puits influence fortement la nouaison et la croissance des fruits (Bertin, 1995). Une limitation de la photosynthèse peut affecter le flux phloémien vers les fruits et pénaliser le rendement (Heuvelink and Buiskool, 1995 ; Ho, 1996). Mais le déséquilibre peut être aussi lié à une trop forte charge en fruits : ceux-ci entrent alors en compétition, ce qui aboutit à une baisse de calibre du fait d'une diminution du nombre et, selon les génotypes, de la taille des cellules (Prudent *et al.*, 2010). Une trop forte charge en fruits peut également pénaliser la croissance du reste de la plante, et sa capacité de production ultérieure de matière sèche (Gautier *et al.*, 2001). La taille des "gourmands" et l'ajustement de la charge en fruits constituent dès lors des opérations culturales indispensables, ajustées pour chaque type variétal et chaque génotype. La maîtrise de la charge est d'autant plus importante pour les variétés grappe qu'elles demandent des récoltes synchrones de fruits de taille et de degré de murissement comparables. Le greffage, qui le plus souvent apporte un surcroît de vigueur végétative, a aussi conduit à modifier la conduite architecturale des plantes. Désormais la plupart des variétés greffées bénéficient d'une conduite à "deux têtes", correspondant à la taille précoce du bourgeon apical pour laisser se développer deux tiges correspondant aux bourgeons axillaires. Cela conduit à diminuer par deux le nombre de graines à l'hectare, cette baisse de coût permettant de compenser le coût du greffage, réalisé en pépinière. Les observations ci-dessus sont surtout valables pour des plantes à très haut rendement, et en situation de lumière faible. Dans beaucoup de cas où les conditions lumineuses sont plus favorables, la plante est limitée par ses puits plutôt que ses sources (Hocking and Steer, 1994 ; Ho, 1996). Le transport d'assimilats vers les fruits est par ailleurs relativement tamponné chez la tomate, qui est, comme toutes les plantes, capable d'exprimer une certaine plasticité phénotypique en réponse à des variations des facteurs de l'environnement. Dans les cas où la photosynthèse n'est pas limitante, la plante accumule de la matière sèche dans ses parties végétatives et diminue son indice de récolte, via notamment un ajustement du rapport masse/surface des feuilles (Heuvelink and Buiskool, 1995 ; Elia and Conversa, 2012). La plante peut aussi ajuster la répartition de ses assimilats en réponse à des stimuli environnementaux, en jouant sur les équilibres aériens et souterrains des organes végétatifs, sans pénaliser la croissance des fruits. Une déficience en azote se traduit classiquement par une augmentation de la taille du compartiment racinaire (Lecompte *et al.*, 2008). Des niveaux largement sous-optimaux d'azote du point de vue de la production de matière sèche peuvent être appliqués avec un faible impact sur le poids frais des fruits, et un gain qualitatif important du fait d'une plus grande teneur en matière sèche et en polyphénols des fruits (Benard *et al.*, 2009). Cependant, malgré des efforts de rationalisation, notamment des apports d'azote, la sur-

fertilisation reste générale, en sol comme en hors-sol, dans de nombreuses régions de production. L'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE) d'une tomate sans restriction d'apport varie entre 0.6 et 2.3 g de fruit sec par litre d'eau (Ayars et al., 1999 ; Katerji et al., 2003 ; Kirda et al., 2004 ; Mayak et al., 2004 ; Lecompte, 2012). Elle est plus élevée pour la tomate de frais que pour la tomate d'industrie, légèrement plus élevée en hors-sol qu'en sol, et plus faible dans les régions chaudes à forte demande climatique. L'efficacité peut grimper jusqu'à 3-3.5 en condition de stress salin ou hydrique (Mayak et al., 2004). Des techniques d'irrigation partielle (*Partial Root Drying*, PRD), consistant à alterner les apports d'eau sur chaque moitié du système racinaire, ont été testées avec succès pour la tomate de frais (Kirda et al., 2004) ou d'industrie (Zegbe et al., 2004), sans perte importante de rendement. Du fait de cette large plasticité phénotypique, et parce que l'irrigation permet de jouer sur cette plasticité, la gestion de l'eau reste au moins autant une problématique de gestion agronomique que d'amélioration génétique. La salinité de l'eau d'irrigation est un problème crucial dans de nombreuses régions de production. La tomate est une espèce modérément sensible, dont le rendement n'est pas affecté pour des eaux dont la conductivité est inférieure à 3 dS.m⁻¹ (Cuartero and Fernandez-Munoz, 1999), ce seuil étant plus élevé lorsque la demande évaporative est faible (Ehret and Ho, 1986 ; Adams, 1991). Une salinité d'environ 2.5 dS.m⁻¹ est obtenue en sol ou en hors-sol par des apports de nutriments seulement légèrement supérieurs à ceux nécessaires pour l'obtention du rendement maximum, ce qui implique de disposer d'une eau d'irrigation peu chargée en éléments non utiles au métabolisme de la plante. Au-delà, la croissance, la photosynthèse, et le flux phloémien vers les fruits sont affectés. L'adaptation variétale à la salinité est un enjeu important. D'une manière générale, les variétés à petits fruits sont mieux à même de résister au stress salin (Cuartero and Fernandez-Munoz, 1999), et la teneur en matière sèche des fruits augmente quasi-linéairement avec la salinité (Ehret and Ho, 1986 ; De Pascale et al., 2001). Certaines régions de production, notamment l'Italie du sud, ont adapté leur offre variétale à l'utilisation d'eaux modérément salines, pour obtenir des fruits à forte qualité gustative.

La lutte biologique a progressé largement indépendamment de l'évolution variétale

On observe une variation assez forte de la tolérance aux ravageurs chez les espèces sauvages apparentées à la tomate cultivée (Lange and Bronson, 1981). Les espèces du genre *Solanum* développent sur leurs feuilles et tiges des trichomes, amas cellulaires leur conférant une protection physique et pouvant, au contact des insectes, rejeter des molécules répulsives ou toxiques - acyles, polyphénols, terpènes (Simmons and Gurr, 2005). Cependant ces molécules peuvent être néfastes aussi bien aux ravageurs de la tomate qu'à leurs ennemis, et les variétés modernes de tomate ne sont pas sélectionnées pour la quantité et l'efficacité de leurs trichomes. La lutte génétique représente aujourd'hui, en dehors du cas unique de la résistance à plusieurs bioagresseurs conférée par le gène *Mi-1* (voir plus haut), un recours limité contre les ravageurs. Les Arthropodes consti-

tuent cependant des menaces à plusieurs titres. Les piqueurs-suceurs (notamment les pucerons, les thrips, les aleurodes et les acariens) peuvent affaiblir la plante et induire des dégâts divers sur les fruits, les rendant non commercialisables, et sont également vecteurs de virus. Les phyllophages (mouches mineuses, noctuelles) affectent la surface photosynthétique, et certains lépidoptères, en particulier *Tuta absoluta*, se développent également sur les tiges et les fruits. La lutte chimique a été pendant plusieurs décennies le principal recours contre ces bioagresseurs. Outre les dégâts environnementaux occasionnés, cela a nécessité le développement régulier de nouvelles molécules, et l'élaboration de stratégies complexes de gestion des résistances aux insecticides développées par les cibles (Palumbo et al., 2001 ; Espinosa et al., 2002 ; Lietti et al., 2005). Depuis les années 1970, la lutte biologique contre les insectes et les agents pathogènes s'est considérablement développée. Il convient de distinguer le contrôle biologique fondé sur les auxiliaires, prédateurs ou parasitoïdes, destiné à limiter le développement des ravageurs, de celui fondé sur des microorganismes, qui vise essentiellement au contrôle des maladies. La lutte biologique a trouvé un terrain d'application favorable avec la serre, où la maîtrise du climat et la possibilité de limiter les échanges biotiques avec l'extérieur constituent des facilitateurs du succès du biocontrôle, même si l'environnement et l'utilisation de substrats artificiels peuvent être aussi dans certains cas favorables au développement des bioagresseurs (Paulitz and Belanger, 2001). Des programmes de lutte intégrée fondés sur la combinaison de lâchers de mirides prédateurs et d'hyménoptères parasitoïdes ont été développés avec succès pour lutter contre les deux principaux fléaux de la tomate ces dernières décennies, les aleurodes (Castane et al., 2004) et plus récemment *Tuta absoluta* (Urbaneja et al., 2009 ; Desneux et al., 2010). Des produits commerciaux sont également disponibles contre les thrips, les pucerons et les acariens. La lutte biologique contre les noctuelles est fondée sur l'utilisation de *Bacillus thuringiensis*. Les techniques reposent sur la pulvérisation de suspensions microbiennes sur les plantes et il n'y a pas en production de recours à des plantes transformées, dont les premières générations ont été produites il y a 25 ans (Fischhoff et al., 1987), capables d'exprimer une protéine issue d'un gène *cry*. En France, le développement de la lutte intégrée s'est généralisé sous serre (plus de 80% des surfaces en bénéficient), ce qui a permis une baisse significative des usages d'insecticides de synthèse: en moyenne actuellement, une douzaine de matières actives par cycle sont appliquées sous serre, essentiellement des fongicides, contre plus d'une trentaine à la fin du XXème siècle. En revanche, la lutte intégrée commence seulement à se développer en production en sol sous tunnel, où elle est plus difficile à appliquer. Le recours aux insecticides y est en conséquence beaucoup plus systématique.

La mise au point de techniques de lutte biologique a aussi concerné les maladies fongiques, les bactérioses, et les dégâts causés par les nématodes. Ces techniques sont fondées pour la plupart sur l'introduction de bactéries ou champignons non pathogènes, parfois bénéfiques au développement de la plante et regroupées sous le nom de *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) et *Plant Growth*

Promoting Fungi (PGPF), ainsi que sur des souches antagonistes de champignons apparentés à des agents pathogènes. Les modes d'actions sont variés : antibiose, compétition, parasitisme, stimulation des défenses des hôtes. Plusieurs espèces de *Bacillus* et de *Pseudomonas* ont une action contre le pythium, le rhizoctone, la fusariose et certaines bactérioses (Mpiga et al., 1997 ; Larkin and Fravel, 1998 ; Paulitz and Belanger, 2001 ; Guo et al., 2004). Les champignons, en particulier ceux du genre *Trichoderma* spp. peuvent agir par compétition ou mycoparasitisme, contre *Rhizoctonia solani*, *Pythium* spp, *Botrytis cinerea*, *Ralstonia solanacearum* et le nématode *Meloidogyne javanica* (Elad et al., 1996 ; Larkin and Fravel, 1998 ; Sharon et al., 2001 ; Jogaiah et al., 2013). Malgré l'intense effort de recherche ces vingt dernières années, l'efficacité au champ de ces méthodes reste partielle et fortement dépendante de leur mode de mise en œuvre. Par ailleurs, la législation européenne, plus contraignante en matière d'autorisation de mise sur le marché, peut limiter leur développement commercial en Europe (Alabouvette et al., 2006). Une meilleure efficacité est attendue à relativement court terme, fondée sur la combinaison de plusieurs agents biologiques et l'association du biocontrôle à d'autres méthodes de lutte (van Lenteren, 2000 ; Guetsky et al., 2001 ; Anith et al., 2004). Ces dernières portent entre autre sur l'apport d'amendements spécifiques, l'utilisation de techniques déjà anciennes de désinfection thermique par vaporisation ou solarisation (Katan et al., 1976), la stimulation de la défense des plantes par des molécules de synthèse ou la manipulation de leur nutrition (Lecompte et al., 2010) et, bien sûr, la lutte génétique, évoquée plus haut. Il faut noter enfin que l'utilisation de PGPR ou de PGPF, qui stimulent la défense systémique induite chez les plantes, les rend à même de mieux se défendre contre les attaques d'herbivores, du fait d'une capacité accrue à synthétiser des composés organiques volatils toxiques ou susceptibles d'attirer des auxiliaires (Thaler, 1999 ; Turlings and Ton, 2006).

Perspectives

Il existe aujourd'hui environ 3900 variétés de tomate inscrites au catalogue européen. Une cinquantaine de nouvelles variétés de tomate sont inscrites au catalogue Français chaque année. Malgré ce dynamisme et cette diversité, on observe de manière récurrente la domination, par segment de marché (type de tomate x mode de production), de quelques variétés et porte-greffe phares. Cette domination dure quelques années, parfois plus longtemps pour les porte-greffes, avant l'apparition de variétés qui les remplacent. Malgré la multiplicité des objectifs de sélection, la course à la productivité reste de mise dans le choix des producteurs, du fait de la concurrence commerciale internationale, de la pression foncière qui accroît les investissements nécessaires dans de nombreuses zones de production et des coûts de l'énergie pour la production sous serre.

La tomate est une plante modèle pour la recherche. Le récent séquençage du génome d'une variété de *Solanum lycopersicum* et d'une accession sauvage de *Solanum pimpinellifolium* permet de connaître les séquences de plus de 33.000 gènes (*The tomato genome consortium*, 2012). Les nouvelles technologies de séquençage permettent de reséquencer

aisément de nouvelles accessions (Causse et al., 2013) et de faire des analyses à l'échelle du génome entier (Xu et al., 2013) pour la recherche de gènes contrôlant des caractères d'intérêts. Ces progrès technologiques devraient accélérer la découverte de gènes d'intérêt et augmenter la précision de la recherche de recombinaisons. Les ressources disponibles pour la recherche en physiologie sont importantes : on dispose de plusieurs milliers de plantes mutées, qui permettent d'explorer les voies métaboliques et le développement de la plante et du fruit. La mutagenèse permet d'aller au-delà de la variabilité génétique naturelle disponible par croisement au sein du genre *Solanum*. Les mutations positionnelles ne peuvent actuellement pas induire de modification majeure des caractères quantitatifs comme les principales fonctions d'élaboration du rendement, mais plutôt des adaptations à des traits aigus de l'environnement, ou des suppressions de caractère simples.

Les progrès futurs vont vers l'adaptation dans les variétés de caractères d'efficacité de transformation des facteurs de production et de qualité, avec une évolution plus marquée, via la diversification, vers la valeur santé des fruits. Au-delà de la maîtrise conjointe des variétés et des conditions de production, l'accès à la qualité organoleptique pour le consommateur impose une intégration de l'ensemble de la filière, notamment pour la maîtrise des conditions post récolte - que nous n'avons volontairement pas abordée ici. Pour les plus optimistes, l'amélioration des connaissances en biologie et en écologie permet d'envisager la disparition à relativement court terme des pesticides de synthèse sous serre (van Lenteren, 2000). Malgré un volume commercial pour l'instant limité, les productions en agriculture biologique - qui bénéficient pleinement de l'amélioration variétale et des techniques de lutte biologique évoquées plus haut - permettent d'obtenir, en culture en sol, une production en quantité et en qualité équivalente à l'agriculture conventionnelle (Clark et al., 1998 ; Colla et al., 2000 ; Gravel et al., 2010). Pour la production conventionnelle, l'absence de reconnaissance par les marchés de consommation de fruits issus d'une culture de saison en sol est peut être préjudiciable au développement de ce segment de production. Il n'a pas les mêmes contraintes que celui de la serre, et pourrait probablement plus facilement valoriser des fruits portant des garanties de qualité et de valeur nutritionnelle.

Bibliographie

- Adams, P., 1991. Effects of increasing the salinity of the nutrient solution with major nutrients or sodium-chloride on the yield, quality and composition of tomatoes grown in rockwool. *Journal of Horticultural Science* **66**, 201-207
- Adams, S.R., Cockshull, K.E., Cave, C.R.J., 2001. Effect of temperature on the growth and development of tomato fruits. *Annals of Botany* **88**, 869-877
- Alabouvette, C., Olivain, C., Steinberg, C., 2006. Biological control of plant diseases: The european situation. *European Journal of Plant Pathology* **114**, 329-341
- Andriveau, D., 2009. Plants, parasites and pathologists: From understanding interaction to sustainable management of resistance. *Cahiers Agricultures* **18**, 486-492

- Anith, K.N., Momol, M.T., Kloepper, J.W., Marois, J.J., Olson, S.M., Jones, J.B., 2004. Efficacy of plant growth-promoting rhizobacteria, acibenzolar-s-methyl, and soil amendment for integrated management of bacterial wilt on tomato. *Plant Disease* **88**, 669-673
- Anton, A., Torrellas, M., Montero, J.I., Ruijs, M., Vermeulen, P., Stanghellini, C., 2012. Environmental impact assessment of dutch tomato crop production in a venlo glasshouse. In: Castilla, N., VanKooten, O., Sase, S., Meneses, J.F., Schnitzler, W.H., VanOs, E. (Eds.), *Xxviii international horticultural congress on science and horticulture for people*, pp. 781-791
- Ayars, J.E., Phene, C.J., Hutmacher, R.B., Davis, K.R., Schoneman, R.A., Vail, S.S., Mead, R.M., 1999. Subsurface drip irrigation of row crops: A review of 15 years of research at the water management research laboratory. *Agricultural Water Management* **42**, 1-27
- Bai, Y., Lindhout, P., 2007. Domestication and breeding of tomatoes: What have we gained and what can we gain in the future? *Annals of Botany* **100**, 1085-1094
- Balibrea, M.E., Martinez-Andujar, C., Cuartero, J., Bolarin, M.C., Perez-Alfocea, F., 2006. The high fruit soluble sugar content in wild lycopersicon species and their hybrids with cultivars depends on sucrose import during ripening rather than on sucrose metabolism. *Functional Plant Biology* **33**, 279-288
- Barrios-Masias, F.H., Jackson, L.E., 2014. California processing tomatoes: Morphological, physiological and phenological traits associated with crop improvement during the last 80 years. *European Journal of Agronomy* **53**, 45-55
- Beckles, D.M., 2012. Factors affecting the postharvest soluble solids and sugar content of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit. *Postharvest Biology and Technology* **63**, 129-140
- Benard, C., Gautier, H., Bourgaud, F., Grasselly, D., Navez, B., Caris-Veyrat, C., Weiss, M., Genard, M., 2009. Effects of low nitrogen supply on tomato (*Solanum lycopersicum*) fruit yield and quality with special emphasis on sugars, acids, ascorbate, carotenoids, and phenolic compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **57**, 4112-4123
- Bertin, N., 1995. Competition for assimilates and fruit position affect fruit-set in indeterminate greenhouse tomato. *Annals of Botany* **75**, 55-65
- Bertin, N., Causse, M., Brunel, B., Tricon, D., Genard, M., 2009. Identification of growth processes involved in qtls for tomato fruit size and composition. *Journal of Experimental Botany* **60**, 237-248
- Blum, A., 2009. Effective use of water (euw) and not water-use efficiency (wue) is the target of crop yield improvement under drought stress. *Field Crops Research* **112**, 119-123
- Boulard, T., Feuilloley, P., Kittas, C., 1997. Natural ventilation performance of six greenhouse and tunnel types. *Journal of Agricultural Engineering Research* **67**, 249-266
- Boulard, T., Raeppe, C., Brun, R., Lecompte, F., Hayer, F., Carmassi, G., Gaillard, G., 2011. Environmental impact of greenhouse tomato production in france. *Agronomy for Sustainable Development* **31**, 757-777
- Brouwer, D.J., Jones, E.S., St Clair, D.A., 2004. Qtl analysis of quantitative resistance to phytophthora infestans (late blight) in tomato and comparisons with potato. *Genome* **47**, 475-492
- Cai, R., Lewis, J., Yan, S., Liu, H., Clarke, C.R., Campanile, F., Almeida, N.F., Studholme, D.J., Lindeberg, M., Schneider, D., Zaccardelli, M., Setubal, J.C., Morales-Lizcano, N.P., Bernal, A., Coaker, G., Baker, C., Bender, C.L., Leman, S., Vinatzer, B.A., 2011. The plant pathogen pseudomonas syringae pv. Tomato is genetically monomorphic and under strong selection to evade tomato immunity. *Plos Pathogens* **7**
- Carmeille, A., Caranta, C., Dintinger, J., Prior, P., Luisetti, J., Besse, P., 2006. Identification of qtls for ralstonia solanacearum race 3-phylo-type ii resistance in tomato. *Theoretical and Applied Genetics* **113**, 110-121
- Carmel-Goren, L., Liu, Y.S., Lifschitz, E., Zamir, D., 2003. The self-pruning gene family in tomato. *Plant Molecular Biology* **52**, 1215-1222
- Castane, C., Alomar, O., Goula, M., Gabarra, R., 2004. Colonization of tomato greenhouses by the predatory mirid bugs macrolophus caliginosus and dicyphus tamaninii. *Biological Control* **30**, 591-597
- Causse, M., Buret, M., Robini, K., Verschave, P., 2003. Inheritance of nutritional and sensory quality traits in fresh market tomato and relation to consumer preferences. *Journal of Food Science* **68**, 2342-2350
- Causse, M., Desplat, N., Pascual, L., Le Paslier, M.C., Sauvage, C., Bauchet, G., Berard, A., Bounon, R., Tchoumakov, M., Brunel, D., Bouchet, J.P., 2013. Whole genome resequencing in tomato reveals variation associated with introgression and breeding events. *Bmc Genomics* **14**
- Clark, M.S., Ferris, H., Klonsky, K., Lanini, W.T., van Bruggen, A.H.C., Zalom, F.G., 1998. Agronomic, economic, and environmental comparison of pest management in conventional and alternative tomato and corn systems in northern california. *Agriculture Ecosystems & Environment* **68**, 51-71
- Colla, G., Mitchell, J.P., Joyce, B.A., Huyck, L.M., Wallender, W.W., Temple, S.R., Hsiao, T.C., Poudel, D.D., 2000. Soil physical properties and tomato yield and quality in alternative cropping systems. *Agronomy Journal* **92**, 924-932
- Cuartero, J., Fernandez-Munoz, R., 1999. Tomato and salinity. *Scientia Horticulturae* **78**, 83-125
- Davis, J., Yu, D., Evans, W., Gokirmak, T., Chetelat, R.T., Stotz, H.U., 2009. Mapping of loci from solanum lycopersicoides conferring resistance or susceptibility to botrytis cinerea in tomato. *Theoretical and Applied Genetics* **119**, 305-314
- De Pascale, S., Maggio, A., Fogliano, V., Ambrosino, P., Ritieni, A., 2001. Irrigation with saline water improves

- carotenoids content and antioxidant activity of tomato. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* **76**, 447-453
- Demers, D.-A., Dorais, M., Wien, C.H., Gosselin, A., 1998. Effects of supplemental light duration on greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* mill.) plants and fruit yields. *Scientia Horticulturae* **74**, 295-306
- Desneux, N., Wajnberg, E., Wyckhuys, K.G., Burgio, G., Arpaia, S., Narváez-Vasquez, C., González-Cabrera, J., Catalán Ruescas, D., Tabone, E., Frandon, J., Pizzol, J., Poncet, C., Cabello, T., Urbaneja, A., 2010. Biological invasion of european tomato crops by *tuta absoluta*: Ecology, geographic expansion and prospects for biological control. *Journal of Pest Science* **83**, 197-215
- Ehret, D.L., Ho, L.C., 1986. The effects of salinity on dry-matter partitioning and fruit-growth in tomatoes grown in nutrient film culture. *Journal of Horticultural Science* **61**, 361-367
- Elad, Y., Malathrakakis, N.E., Dik, A.J., 1996. Biological control of botrytis-incited diseases and powdery mildews in greenhouse crops. *Crop Protection* **15**, 229-240
- Elia, A., Conversa, G., 2012. Agronomic and physiological responses of a tomato crop to nitrogen input. *European Journal of Agronomy* **40**, 64-74
- Espinosa, P.J., Bielza, P., Contreras, J., Lacasa, A., 2002. Insecticide resistance in field populations of *frankliniella occidentalis* (pergande) in murcia (south-east spain). *Pest Management Science* **58**, 967-971
- Estan, M.T., Martinez-Rodriguez, M.M., Perez-Alfocea, F., Flowers, T.J., Bolarin, M.C., 2005. Grafting raises the salt tolerance of tomato through limiting the transport of sodium and chloride to the shoot. *Journal of Experimental Botany* **56**, 703-712
- Fatnassi, H., Boulard, T., Poncet, C., Chave, M., 2006. Optimisation of greenhouse insect screening with computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering* **93**, 301-312
- Finkers, R., van Heusden, A.W., Meijer-Dekens, F., van Kan, J.A.L., Maris, P., Lindhout, P., 2007. The construction of a *solanum habrochaites* lyc4 introgression line population and the identification of qtls for resistance to botrytis cinerea. *Theoretical and Applied Genetics* **114**, 1071-1080
- Fischhoff, D.A., Bowdish, K.S., Perlak, F.J., Marrone, P.G., McCormick, S.M., Niedermeyer, J.G., Dean, D.A., Kusano-Kretzmer, K., Mayer, E.J., Rochester, D.E., Rogers, S.G., Fraley, R.T., 1987. Insect tolerant transgenic tomato plants. *Nat Biotech* **5**, 807-813
- Foolad, M.R., 2007. Genome mapping and molecular breeding of tomato. *International journal of plant genomics* **2007**, 64358-64358
- Fridman, E., Pleban, T., Zamir, D., 2000. A recombination hotspot delimits a wild-species quantitative trait locus for tomato sugar content to 484 bp within an invertase gene. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **97**, 4718-4723
- Fry, W., 2008. Phytophthora infestans: The plant (and r gene) destroyer. *Molecular Plant Pathology* **9**, 385-402
- Fulton, T.M., BeckBunn, T., Emmatty, D., Eshed, Y., Lopez, J., Petiard, V., Uhlig, J., Zamir, D., Tanksley, S.D., 1997. Qtl analysis of an advanced backcross of *lycopersicon peruvianum* to the cultivated tomato and comparisons with qtls found in other wild species. *Theoretical and Applied Genetics* **95**, 881-894
- Gautier, H., Guichard, S., Tchamitchian, M., 2001. Modulation of competition between fruits and leaves by flower pruning and water fogging, and consequences on tomato leaf and fruit growth. *Annals of Botany* **88**, 645-652
- Giovannoni, J.J., 2007. Fruit ripening mutants yield insights into ripening control. *Current Opinion in Plant Biology* **10**, 283-289
- Grandillo, S., Zamir, D., Tanksley, S., 1999. Genetic improvement of processing tomatoes: A 20 years perspective. *Euphytica* **110**, 85-97
- Gravel, V., Blok, W., Hallmann, E., Carmona-Torres, C., Wang, H., Van de Peppel, A., Condor Golec, A.F., Dorais, M., Van Meeterens, U., Heuvelink, E., Rembialkowska, E., Van Bruggen, A.H.C., 2010. Differences in n uptake and fruit quality between organically and conventionally grown greenhouse tomatoes. *Agronomy for Sustainable Development* **30**, 797-806
- Guetsky, R., Shtienberg, D., Elad, Y., Dinoor, A., 2001. Combining biocontrol agents to reduce the variability of biological control. *Phytopathology* **91**, 621-627
- Guo, J.H., Qi, H.Y., Guo, Y.H., Ge, H.L., Gong, L.Y., Zhang, L.X., Sun, P.H., 2004. Biocontrol of tomato wilt by plant growth-promoting rhizobacteria. *Biological Control* **29**, 66-72
- Hall, T.J., 1980. Resistance at the tm-2 locus in the tomato to tomato mosaic-virus. *Euphytica* **29**, 189-197
- He, F.F., Chen, Q., Jiang, R.F., Chen, X.P., Zhang, F.S., 2007. Yield and nitrogen balance of greenhouse tomato (*lycopersicon esculentum* mill.) with conventional and site-specific nitrogen management in northern china. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **77**, 1-14
- Heuvelink, E., Buiskool, R.P.M., 1995. Influence of sink-source interaction on dry-matter production in tomato. *Annals of Botany* **75**, 381-389
- Ho, L.C., 1996. The mechanism of assimilate partitioning and carbohydrate compartmentation in fruit in relation to the quality and yield of tomato. *Journal of Experimental Botany* **47**, 1239-1243
- Ho, L.C., 1998. Improving tomato fruit quality by cultivation. In: Cockshull, K.E., Gray, D., Seymour, G.B., Thomas, B. (Eds.), *Genetic and environmental manipulation of horticultural crops*. CAB International, New York, pp. 17-29
- Hocking, P.J., Steer, B.T., 1994. The distribution and identity of assimilates in tomato with special reference to stem reserves. *Annals of Botany* **73**, 315-325.
- Jogaiah, S., Abdelrahman, M., Tran, L.-S.P., Shin-ichi, I., 2013. Characterization of rhizosphere fungi that mediate

- resistance in tomato against bacterial wilt disease. *Journal of Experimental Botany* **64**, 3829-3842
- Joosten, M., de Wit, P., 1999. The tomato - *cladosporium fulvum* interaction: A versatile experimental system to study plant-pathogen interactions. *Annual Review of Phytopathology* **37**, 335-367
- Katan, J., Greenberger, A., Alon, H., Grinstein, A., 1976. Solar heating by polyethylene mulching for control of diseases caused by soil-borne pathogens. *Phytopathology* **66**, 683-688
- Katerji, N., van Hoorn, J.W., Hamdy, A., Mastrorilli, M., 2003. Salinity effect on crop development and yield, analysis of the salt tolerance according to several classification methods. *Agricultural Water Management* **62**, 37-66
- Kawchuk, L.M., Hachey, J., Lynch, D.R., Kulcsar, F., van Rooijen, G., Waterer, D.R., Robertson, A., Kokko, E., Byers, R., Howard, R.J., Fischer, R., Prufer, D., 2001. Tomato ve disease resistance genes encode cell surface-like receptors. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **98**, 6511-6515
- King, S.R., Davis, A.R., Zhang, X., Crosby, K., 2010. Genetics, breeding and selection of rootstocks for solanaceae and cucurbitaceae. *Scientia Horticulturae* **127**, 106-111
- Kirda, C., Cetin, M., Dasgan, Y., Topcu, S., Kaman, H., Ekici, B., Derici, M.R., Ozguven, A.I., 2004. Yield response of greenhouse grown tomato to partial root drying and conventional deficit irrigation. *Agricultural Water Management* **69**, 191-201
- Lange, W.H., Bronson, L., 1981. Insect pests of tomatoes. *Annual Review of Entomology* **26**, 345-371
- Larkin, R.P., Fravel, D.R., 1998. Efficacy of various fungal and bacterial biocontrol organisms for control of fusarium wilt of tomato. *Plant Disease* **82**, 1022-1028
- Lebeau, A., Daunay, M.C., Frary, A., Palloix, A., Wang, J.F., Dintinger, J., Chiroleu, F., Wicker, E., Prior, P., 2011. Bacterial wilt resistance in tomato, pepper, and eggplant: Genetic resources respond to diverse strains in the *rastonia solanacearum* species complex. *Phytopathology* **101**, 154-165
- Lecompte, F., 2012. Management of soil nitrate heterogeneity resulting from crop rows in a lettuce–tomato rotation under a greenhouse. *Agronomy for Sustainable Development* **32**, 811-819
- Lecompte, F., Abro, M.A., Nicot, P., 2010. Contrasted responses of botrytis cinerea strains developing on tomato plants grown under different nitrogen nutrition regimes. *Plant Pathology* **59**, 891-899
- Lecompte, F., Bressoud, F., Parès, L., De Bruyne, F., 2008. Root and nitrate distribution as related to the critical plant-n status of a fertigated tomato crop. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* **83**, 223-231
- Li, J., Liu, L., Bai, Y., Finkers, R., Wang, F., Du, Y., Yang, Y., Xie, B., Visser, R.G.F., van Heusden, A.W., 2011. Identification and mapping of quantitative resistance to late blight (*phytophthora infestans*) in *solanum habrochaites* la1777. *Euphytica* **179**, 427-438
- Lietti, M.M.M., Botto, E., Alzogaray, R.A., 2005. Insecticide resistance in argentine populations of *tuta absoluta* (meyrick) (lepidoptera : Gelechiidae). *Neotropical Entomology* **34**, 113-119
- Martin, B., Nienhuis, J., King, G., Schaefer, A., 1989. Restriction fragment length polymorphisms associated with water-use efficiency in tomato. *Science* **243**, 1725-1728
- Mayak, S., Tirosh, T., Glick, B.R., 2004. Plant growth-promoting bacteria confer resistance in tomato plants to salt stress. *Plant Physiology and Biochemistry* **42**, 565-572
- Miller, J.C., Tanksley, S.D., 1990. Rflp analysis of phylogenetic-relationships and genetic-variation in the genus *lycopersicon*. *Theoretical and Applied Genetics* **80**, 437-448
- Milligan, S.B., Bodeau, J., Yaghoobi, J., Kaloshian, I., Zabel, P., Williamson, V.M., 1998. The root knot nematode resistance gene *mi* from tomato is a member of the leucine zipper, nucleotide binding, leucine-rich repeat family of plant genes. *Plant Cell* **10**, 1307-1319
- Miltau, O., Zamir, D., Rudich, J., 1986. Growth-rates of *lycopersicon* species at low-temperatures. *Zeitschrift Fur Pflanzenzuchtung-Journal of Plant Breeding* **96**, 193-199
- Montero, J.I., Stanghellini, C., Castilla, N., 2009. Greenhouse technology for sustainable production in mild winter climate areas: Trends and needs. *International Symposium on Strategies Towards Sustainability of Protected Cultivation in Mild Winter Climate* **807**, 33-44
- Moore, S., Vrebalov, J., Payton, P., Giovannoni, J., 2002. Use of genomics tools to isolate key ripening genes and analyse fruit maturation in tomato. *Journal of Experimental Botany* **53**, 2023-2030
- Mpiga, P., Belanger, R.R., Paulitz, T.C., Benhamou, N., 1997. Increased resistance to fusarium oxysporum f. Sp. *Radicalis-lycopersici* in tomato plants treated with the endophytic bacterium *pseudomonas fluorescens* strain 63-28. *Physiological and Molecular Plant Pathology* **50**, 301-320
- Nombela, G., Williamson, V.M., Muniz, M., 2003. The root-knot nematode resistance gene *mi-1.2* of tomato is responsible for resistance against the whitefly *bemisia tabaci*. *Molecular Plant-Microbe Interactions* **16**, 645-649
- Palumbo, J.C., Horowitz, A.R., Prabhaker, N., 2001. Insecticidal control and resistance management for *bemisia tabaci*. *Crop Protection* **20**, 739-765
- Paulitz, T.C., Belanger, R.R., 2001. Biological control in greenhouse systems. *Annual Review of Phytopathology* **39**, 103-133
- Picken, A.J.F., 1984. A review of pollination and fruit-set in the tomato (*lycopersicon-esculentum* mill). *Journal of Horticultural Science* **59**, 1-13
- Prudent, M., Bertin, N., Genard, M., Munos, S., Rolland, S., Garcia, V., Petit, J., Baldet, P., Rothan, C., Causse, M., 2010. Genotype-dependent response to carbon availability in growing tomato fruit. *Plant Cell and Environment* **33**, 1186-1204

- Rodriguez, G.R., Munos, S., Anderson, C., Sim, S.C., Michel, A., Causse, M., Gardener, B.B.M., Francis, D., van der Knaap, E., 2011. Distribution of sun, ovate, lc, and fas in the tomato germplasm and the relationship to fruit shape diversity. *Plant Physiology* **156**, 275-285
- Rouphael, Y., Schwarz, D., Krumbein, A., Colla, G., 2010. Impact of grafting on product quality of fruit vegetables. *Scientia Horticulturae* **127**, 172-179
- Salmeron, J.M., Oldroyd, G.E.D., Rommens, C.M.T., Scofield, S.R., Kim, H.S., Lavelle, D.T., Dahlbeck, D., Staskawicz, B.J., 1996. Tomato prf is a member of the leucine-rich repeat class of plant disease resistance genes and lies embedded within the pto kinase gene cluster. *Cell* **86**, 123-133
- Sharon, E., Bar-Eyal, M., Chet, I., Herrera-Estrella, A., Kleinfeld, O., Spiegel, Y., 2001. Biological control of the root-knot nematode *meloidogyne javanica* by *trichoderma harzianum*. *Phytopathology* **91**, 687-693
- Simmons, A.T., Gurr, G.M., 2005. Trichomes of lycopersicon species and their hybrids: Effects on pests and natural enemies. *Agricultural and Forest Entomology* **7**, 265-276
- Simons, G., Groenendijk, J., Wijbrandi, J., Reijans, M., Groenen, J., Diergaarde, P., Van der Lee, T., Bleeker, M., Onstenk, J., de Both, M., Haring, M., Mes, J., Cornelissen, B., Zabeau, M., Vos, P., 1998. Dissection of the fusarium i2 gene cluster in tomato reveals six homologs and one active gene copy. *Plant Cell* **10**, 1055-1068
- Tanksley, S.D., 2004. The genetic, developmental, and molecular bases of fruit size and shape variation in tomato. *Plant Cell* **16**, S181-S189
- Tanksley, S.D., Grandillo, S., Fulton, T.M., Zamir, D., Eshed, Y., Petiard, V., Lopez, J., BeckBunn, T., 1996. Advanced backcross qtl analysis in a cross between an elite processing line of tomato and its wild relative *L-pimpinellifolium*. *Theoretical and Applied Genetics* **92**, 213-224
- Thaler, J.S., 1999. Jasmonate-inducible plant defences cause increased parasitism of herbivores. *Nature* **399**, 686-688
- Thompson, R.B., Gallardo, M., Rodríguez, J.S., Sánchez, J.A., Magán, J.J., 2013. Effect of n uptake concentration on nitrate leaching from tomato grown in free-draining soilless culture under mediterranean conditions. *Scientia Horticulturae* **150**, 387-398
- Thoquet, P., Olivier, J., Sperisen, C., Rogowsky, P., Prior, P., Anais, G., Mangin, B., Bazin, B., Nazer, R., Grimsley, N., 1996. Polygenic resistance of tomato plants to bacterial wilt in the french west indies. *Molecular Plant-Microbe Interactions* **9**, 837-842
- Turlings, T.C.J., Ton, J., 2006. Exploiting scents of distress: The prospect of manipulating herbivore-i Fulton, T.M., BeckBunn, T., Emmatty, D., Eshed, Y., Lopez, J., Petiard, V., Uhlig, J., Zamir, D., Tanksley, S.D., 1997. Qtl analysis of an advanced backcross of lycopersicon peruvianum to the cultivated tomato and comparisons with qtls found in other wild species. *Theoretical and Applied Genetics* **95**, 881-894. nduced plant odours to enhance the control of agricultural pests. *Current Opinion in Plant Biology* **9**, 421-427
- Urbaneja, A., Monton, H., Molla, O., 2009. Suitability of the tomato borer *tuta absoluta* as prey for *macrolophus pygmaeus* and *nesidiocoris tenuis*. *Journal of Applied Entomology* **133**, 292-296
- Van der Ploeg, A., van der Meer, M., Heuvelink, E., 2007. Breeding for a more energy efficient greenhouse tomato: Past and future perspectives. *Euphytica* **158**, 129-138
- Van Lenteren, J.C., 2000. A greenhouse without pesticides: Fact or fantasy? *Crop Protection* **19**, 375-384
- Venema, J.H., Dijk, B.E., Bax, J.M., van Hasselt, P.R., Elzenga, J.T.M., 2008. Grafting tomato (*solanum lycopersicum*) onto the rootstock of a high-altitude accession of *solanum habrochaites* improves suboptimal-temperature tolerance. *Environmental and Experimental Botany* **63**, 359-367
- Vidavsky, F., Czosnek, H., 1998. Tomato breeding lines resistant and tolerant to tomato yellow leaf curl virus issued from *lycopersicon hirsutum*. *Phytopathology* **88**, 910-914
- Williamson, V.M., 1998. Root-knot nematode resistance genes in tomato and their potential for future use. *Annual Review of Phytopathology* **36**, 277-293
- Williamson, V.M., Kumar, A., 2006. Nematode resistance in plants: The battle underground. *Trends in Genetics* **22**, 396-403
- Xu, J.X., Ranc, N., Munos, S., Rolland, S., Bouchet, J.P., Desplat, N., Le Paslier, M.C., Liang, Y., Brunel, D., Causse, M., 2013. Phenotypic diversity and association mapping for fruit quality traits in cultivated tomato and related species. *Theoretical and Applied Genetics* **126**, 567-581
- Xu, X., Martin, B., Comstock, J.P., Vision, T.J., Tauer, C.G., Zhao, B., Pausch, R.C., Knapp, S., 2008. Fine mapping a qtl for carbon isotope composition in tomato. *Theoretical and Applied Genetics* **117**, 221-233
- Zegbe, J.A., Behboudiana, M.H., Clothier, B.E., 2004. Partial rootzone drying is a feasible option for irrigating processing tomatoes. *Agricultural Water Management* **68**, 195-206

Réflexions sur l'évolution des cépages et des modes de conduite dans le Saumurois

Aymeric HILLAIRE*

*Vigneron au Puy Notre Dame, sud Saumurois

Dans l'ensemble des vignobles et peut-être davantage dans ceux dits du nord (Loire, Alsace, Bourgogne, Jura...), on observe depuis le début des années 2000 un avancement des dates de récolte. Si les millésimes 2012 et 2013 font exception avec des vendanges en Anjou-Saumur normales à tardives (mi-octobre), la série des 2003-2005-2006-2009-2010 et 2011 est marquée par des dates ayant une à trois semaines d'avance sur les moyennes des années 1970 à 2000. Est-ce simplement un cycle de 10 ans ou un véritable changement climatique ?

Les conséquences sur les vignes, la maturité des raisins et les vins sont bien palpables. À l'heure où la consommation du vin en France et en Europe évolue - « consommer moins mais mieux » - la demande pour des vins moins riches en alcool augmente. Or, à Saumur ou Chinon, lors des millésimes précoces cités précédemment, il n'est actuellement pas rare de trouver des bouteilles titrant de 13 à 14,5 % d'alcool dans un domaine conduisant ses vignes pour produire de jolis vins de terroir et de garde.

Les vins sont-ils meilleurs ou moins bons ? Non, ils sont simplement différents, dans un style plus puissant et massif comme l'écrivent les journalistes viticoles. Dans notre région, pour un vin de 2011, l'aromatique d'un Cabernet franc est souvent dominé par les fruits très murs ou le pruneau, bien loin des fruits noirs acidulés et croquants d'un vin de 2007 ou 2012. On parle alors de vin atypique pour ces années comme 2011, 2009 ou 2003. Mais cette palette inhabituelle chez nous ne sera-t-elle pas la nouvelle gamme aromatique des Cabernet franc de Loire dans les prochaines décennies ? Un Saumur ou un Bourgueil titrant 13,5 % ne deviendront-ils pas monnaie courante ?

Pour s'adapter à ces changements climatiques, faut-il adopter des cépages venant du Sud ou mieux conduire certains vignobles locaux ?

La vigne, culture pérenne, est cultivée pendant 40 à 70 ans et la plantation d'un hectare coûte environ 20.000€ (avec

une première vraie récolte à quatre ans). Il est en conséquence risqué d'entreprendre dès maintenant une restructuration des cépages utilisées dans la Loire ou ailleurs. La vigne et le vin demandent de la sagesse et de l'observation ! On lit parfois qu'à Bordeaux, le cépage Syrah provenant des Côtes du Rhône arriverait maintenant à maturité... Avant de faire remonter des cépages d'un vignoble plus méridional afin de « s'adapter au réchauffement », ne faut-il pas d'abord faire le bilan des cépages locaux les mieux adaptés ? Par exemple en Anjou Saumur, le Grolleau est un cépage autochtone qui a longtemps été décrié car donnant des vins peu riches en alcool, souvent dilués et qualifiés de « bon qu'à produire du rosé ». Des vigneron angevins montrent depuis quelques années qu'avec des conduites visant des rendements modérés (30 à 45HL/ha), le Grolleau peut produire des vins rouges de grande qualité, reconnus dans le milieu initié et professionnel comme des vins de haut niveau, confondus souvent à l'aveugle avec des Syrah de Saint Joseph. Même lors des millésimes chauds et secs, le Grolleau garde un degré d'alcool modéré, rarement supérieur à 12,5 % et une acidité plutôt élevée. L'esprit d'un beau vin de Loire caractérisé par sa fraîcheur et sa finesse est ainsi conservé. Et cerise sur le « gros lot », ce cépage autochtone montre une résistance aux maladies cryptogamiques de la région bien supérieure à ces confrères. Bien moins sensible au mildiou que le Chenin et le Cabernet franc (les deux cépages principaux du vignoble), il est même presque insensible à l'oïdium. Là aussi, de tels atouts sont à considérer à l'heure où l'utilisation des produits phytosanitaires de synthèse pèse lourd sur l'environnement...

Les grandes instances viticoles devraient donc réviser leur point de vue sur ce cépage qui est autorisé pour les rosés AOC mais ne l'est actuellement pas en AOC Saumur ni en Anjou rouge (sauf à hauteur de 10 % maximum en Anjou). Seuls quelques vigneron « qualitatifs » le travaillent en rouge et sortent ainsi du cadre des AOC pour se « déclasser » en vin de France. Pourtant le vin produit à partir de ce cépage autochtone peut atteindre maintenant une grande qualité !

Quelle conduite des vignobles face aux évolutions climatiques et aux sécheresses plus fréquentes ?

L'enherbement des vignobles a été, dans beaucoup d'endroits, systématisé. Il induit dans certains contextes une concurrence positive pour la vigne mais sa mise en place n'a pas été assez réfléchie en fonction de l'âge de la plantation et des sols. Ainsi, une jeune vigne n'a pas le même enracinement qu'une plantation de 30 ans et des sécheresses marquées (lesquelles ont été fréquentes lors de cette dernière décennie) la pénalise fortement lorsqu'elle est enherbée. Autre exemple : les années sèches, l'enherbement pénalise les vignes implantées sur des sols à faible réserve hydrique, laquelle est très variable dans notre région : elle est voisine de 40 mm pour un sol de schiste en Anjou ou sur des sables à Chinon alors qu'elle peut atteindre 100 à 150 mm pour un sol calcaire de tuffeau.

En agriculture conventionnelle, l'enherbement a souvent aussi été « semé » avec utilisation d'espèces rarement locales. L'enherbement naturel pratiqué classiquement en

agriculture biologique ne s'adapte-t-il pas davantage aux caractéristiques du sol ?

Il pourrait être aussi bon de revoir les besoins de la vigne en fonction des périodes végétatives. La maxime « une vigne doit souffrir pour faire un bon vin » est un raccourci et, comme l'homme qui travaille, la vigne ne doit pas manquer d'eau ni de nourriture... Contrairement aux idées reçues, le besoin en eau et en azote est très important lors des premiers mois de son cycle (avril à fin juin = fin floraison-nouaison). Un stress hydrique estival peut ainsi avoir des impacts accentués lorsqu'il y a eu des déficits en eau et nutriments au printemps. Une difficile quête de l'équilibre doit être recherchée.

Enfin, il est observé qu'un sol ayant un bon fonctionnement microbien caractérisé par une bonne porosité et un aspect grumeleux créés par l'activité microbienne présente une réserve hydrique bien supérieure à celle d'un sol compacté. Cela est admis mais, en viticulture classique, l'utilisation de tracteurs et matériels de plus en plus lourds sur des sols rarement travaillés n'est pas favorable à la vie des sols et à la constitution de meilleures réserves hydriques.

Le constat est le même avec l'utilisation de désherbants chimiques. Outre les problèmes importants de pollutions des eaux, risques pour les utilisateurs, ces produits diminuent la vitalité microbienne des sols et donc la réserve hydrique. Il est facile d'observer, après une forte précipitation, la différence entre une parcelle désherbée parfois totalement et une parcelle travaillée ou enherbée. Dans le premier cas, l'eau ruisselle et entraîne de l'érosion en cas de pente, elle stagne et augmente le risque de maladies cryptogamiques sur une zone plane ou en cuvette.

C'est donc un ensemble de techniques culturales qui doit être repensé pour répondre à ces changements importants de climatologie.

Bien réfléchir avant de modifier le choix des cépages

Face aux modifications actuelles du cycle de la vigne, les réflexions doivent être globales. Avant de restructurer le vignoble français et de proposer de modifier l'encépagement souvent ancestral des régions viticoles, il paraît important de faire un état des lieux avec analyse de la pertinence des cépages existants, en lien avec les pratiques culturales mises en œuvre et leurs conséquences. Les vignerons pourront très certainement trouver une grande partie des réponses grâce à l'observation, à leur bon sens et aux échanges entre eux, et ne pas forcément suivre les orientations parfois trop systématiques et « dirigistes » des grandes instances viticoles.

Le Catalogue Officiel : un outil évolutif au service de l'agriculture et de sa multiperformance

Fabien MASSON* – Christian LECLERC**

*Responsable Animation et Expertise VATE GEVES - Domaine de l'Anjouère - 49370 La Pouëze - France
Tél. : 02 41 22 85 91 - E-mail : fabien.masson@geves.fr

**Secrétaire Général du CTPS - GEVES - 25 rue Georges Morel - CS 90024 - 49071 Beaucouzé Cedex - France
Tél. : 02 41 22 85 90 - E-mail : christian.leclerc@geves.fr

Résumé

Le CTPS oriente le progrès génétique en proposant des règles techniques d'inscription des nouvelles variétés au Catalogue Officiel. Ces règles visent à la meilleure adéquation entre les objectifs des utilisateurs des variétés, ceux de la société civile ainsi que des pouvoirs publics et les capacités scientifiques et techniques des sélectionneurs. Tout d'abord, l'article montre comment le CTPS a adapté ses règles face aux évolutions des besoins de l'agriculture. Puis, l'article présente les évolutions actuelles du CTPS pour viser la double performance économique et environnementale de l'agriculture. La démarche VATE sera présentée : elle vise à orienter le progrès génétique vers des variétés adaptées à des itinéraires techniques diversifiés et permettant de répondre à la réduction des intrants, tout en maintenant les objectifs de productivité, qualité et régularité de la production.

Mots-clés

Progrès génétique - objectifs de sélection - sélection variétale - catalogue officiel.

Abstract

In France, the Technical Committee for Plant Breeding (CTPS) proposes to the Ministry of Agriculture the registration of varieties in the Official Catalogue. Its main mission is to support and guide the genetic progress by elaborating rules for the registration of the new varieties. These rules aim to answer the needs of the users of varieties, the objectives of civil society and public authorities while taking into account the technical and scientific abilities of breeders. The first part of this paper presents some examples of changes of rules decided in the past by CTPS in order to take into account new needs of agriculture. In a second part, the paper shows how CTPS is currently taking into account the objective of a more sustainable agriculture. The aim of this new impulsion is to reinforce already engaged actions and to target genetic progress towards varieties adapted to agro-environmental constraints and diversified cultural practices that favor the decrease of inputs use, while maintaining the objectives of productivity, quality and regularity of production.

Key-words

Genetic progress - breeding objectives - plant breeding - breeding official catalog.

Introduction

Depuis 1942, le Comité Technique Permanent de la Sélection des plantes cultivées (CTPS) a en charge d'accompagner le Ministère de l'Agriculture dans la mise en œuvre des politiques publiques dans le secteur des Variétés, Semences & Plants. En particulier, le CTPS propose au Ministère l'inscription de nouvelles variétés au Catalogue Officiel français. Au delà de la gestion du Catalogue, le CTPS a pour mission d'accompagner et d'orienter le progrès génétique en proposant des règlements techniques d'inscription qui visent à la meilleure adéquation entre les objectifs des utilisateurs des variétés, ceux de la société civile ainsi que des pouvoirs publics et les capacités scientifiques et techniques des créateurs de variétés. Après un rappel des missions et du fonctionnement du CTPS, il sera montré dans une première partie, sur quelques exemples, comment le CTPS a fait évoluer les règles d'inscription en fonction de l'évolution des besoins de l'agriculture française. Dans une deuxième partie, l'article illustre comment le CTPS intègre aujourd'hui de nouveaux objectifs dont la multi-performance de l'agriculture : en particulier, sur les plans économique et environnemental. Cette seconde partie s'appuiera essentiellement sur une présentation de la démarche du CTPS qui vise à orienter le progrès génétique vers des variétés adaptées à des itinéraires techniques diversifiés et permettant de répondre à la réduction des intrants, mais également sur une présentation d'exemples d'ouverture du Catalogue à une plus large gamme de variétés.

Adaptation historique du CTPS aux évolutions des besoins de l'agriculture

Les missions du CTPS

L'objectif premier de la réglementation « Variétés, Semences & Plants » est de garantir à l'utilisateur une semence saine, loyale et marchande. C'est d'ailleurs à la demande des agriculteurs que les premiers dispositifs réglementaires ont été mis en place en France dans les années 1920 et 1930, dispositifs repris en 1942 par le CTPS. La législation française, comme la législation européenne, repose sur 2 piliers que sont le « Catalogue » et la « Certification ».

La réglementation « Catalogue » impose pour la commercialisation d'une variété une inscription sur un registre officiel. L'autorisation de mise sur la marché est accordée sur la base d'études DHS (Distinction, Homogénéité, Stabilité) et, dans le cas des espèces agricoles (grandes cultures, fourrages et gazons), d'études VAT (Valeur Agronomique et Technologique, devenue récemment VATE - « E » pour « Environnementale »). Le critère DHS garantit à l'utilisateur que la variété qu'il a choisie est parfaitement identifiable donc distincte de toute autre variété déjà inscrite au Catalogue Officiel, le critère VATE garantit que la variété possède une valeur culturelle et d'utilisation suffisante.

Pour les espèces agricoles et potagères, l'inscription à un catalogue officiel national vaut extension de son inscription au Catalogue de l'Union Européenne. Pour les arbres fruitiers et la vigne, il existe un catalogue en France (non obligatoire pour les fruitiers) mais pas de catalogue communautaire.

La réglementation « Certification », quant à elle, doit garantir à l'utilisateur que les semences ou les plants qu'il achète sont bien ceux de la variété choisie, qu'ils possèdent un minimum de pureté variétale et répondent à des normes technologiques (faculté germinative notamment) et éventuellement sanitaires.

Le CTPS a pour mission de proposer au Ministère les Règlements techniques d'Inscription et les Règlements techniques de Certification. C'est grâce à ces deux piliers qu'il a été possible et qu'il est encore aujourd'hui possible pour les pouvoirs publics d'orienter le progrès génétique et de s'assurer de sa mise à disposition auprès des filières et des utilisateurs pour répondre aux enjeux et aux besoins du moment.

Le fonctionnement du CTPS

Le CTPS est composé d'un Comité Plénier chargé de coordonner l'évolution de la réglementation et de sa mise en œuvre par 14 Sections spécialisées par groupe d'espèces. Un Comité Scientifique en appui du Comité Plénier et des Sections formule des avis et recommandations sur les acquis scientifiques les plus récents pouvant avoir un impact ou des applications pour la sélection ou pour l'évaluation des variétés et de la qualité des semences.

Comité Plénier et Sections sont composés d'autant de membres du secteur public que du secteur privé (tableaux 1 et 2). Le secteur public est représenté en particulier par les Ministères de l'Agriculture et celui de l'Ecologie (depuis 2009) ainsi que par des scientifiques d'organismes publics de recherche comme l'INRA. Pour le secteur privé, l'ensemble de chaque filière est représenté : obtenteurs, entreprises et agriculteurs producteurs de semences, agriculteurs utilisateurs de semences, industriels utilisateurs des produits de récolte, instituts techniques et représentants de la société civile. Chaque Section se réunit 1 à 3 fois par an et examine les résultats et les propositions des différentes commissions d'experts. Au sein de chaque commission, on retrouve également une représentativité de l'ensemble de la filière. Ces commissions du CTPS examinent les résultats des études DHS et VATE présentés par le Groupe d'Etude et de contrôle des Variétés et des Semences (GEVES). Département de l'INRA créé en 1971, le GEVES est depuis 1989 un Groupement d'Intérêt Public dont les membres fondateurs sont l'INRA, le Ministère de l'Agriculture et le Groupement National Interprofessionnel des Semences et plants (GNIS). Les membres du CTPS sont désormais nommés tous les 5 ans. Chaque renouvellement est l'occasion de faire évoluer la composition du CTPS. Ainsi, depuis 2011, les instituts techniques sont formellement représentés au Comité Plénier qui s'est également ouvert à des organisations de consommateurs et à des associations environnementalistes. Chaque Section compte désormais un représentant de la filière agriculture biologique.

Cette composition du CTPS permet d'assurer une confrontation des besoins et contraintes de chaque partie prenante, ce qui se traduit par une coconstruction des règles d'inscription résultant d'un compromis entre les besoins des différents utilisateurs et les capacités d'innovation des obtenteurs.

Secteur Public	Secteur Privé
Président (Ministère de l'Agriculture)	Vice-Président (Représentant des Obtenteurs)
Secrétaire Général (GEVES)	5 Obtenteurs de variétés (UFS)
4 représentants du Ministère de l'Agriculture (3 de la DGAL, 1 de la DGPAAT)	
1 représentant du Ministère de l'Ecologie (CGDD)	4 Producteurs de semences ou plants (2 FNAMS, FNPSMS, CEP)
1 représentant du Ministère de l'Economie (DGCCRF)	
2 chefs de département INRA (BAP, SPE)	
Le Directeur du GEVES	4 Utilisateurs de semences et plants représentants les 4 syndicats agricoles représentatifs (FNSEA, JA, Coordination Rurale, Confédération Paysanne)
Le Responsable de l'INOV	
Le Chef du SOC	
2 représentants du GNIS (Président et Directeur)	2 Utilisateurs des produits des récoltes obtenues à partir des semences et plants (Sofiprotéol, ANIA)
6 membres du Comité Scientifique dont le Président	4 représentants des instituts techniques des principales filières végétales (ACTA, CETIOM, CTIFL, ITAB)
	2 représentants des consommateurs et des associations de protection de l'environnement (1 en cours de nomination, 1 France Nature Environnement)
Les Présidents et Secrétaires Techniques des 14 Sections	

Définition des sigles non déjà développés dans le texte de l'article :

DGAL : Direction Générale de l'Alimentation - **DGPAAT** : Direction Générale des Politiques Agricoles, Alimentaires et des Territoires - **DGCCRF** : Direction Générale de la Concurrence, de la Consommation et de la Répression des Fraudes - **CGDD** : Commissariat Général au Développement Durable - **BAP** : Biologie et Amélioration des Plantes - **SPE** : Santé des Plantes et Environnement - **INOV** : Instance Nationale des Obtentions Végétales - **SOC** : Service Officiel de Contrôle et de Certification - **UFS** : Union Française des Semenciers - **FNAMS** : Fédération Nationale des Agriculteurs Multiplicateurs de Semences - **FNPSMS** : Fédération Nationale de la Production de Semences de Maïs et de Sorgho - **CEP** : Centre d'Expérimentation des Pépinières - **ANIA** : Association Nationale des Industries Alimentaires - **ACTA** : Réseau des instituts des filières animales et végétales - **CETIOM** : Centre technique interprofessionnel des oléagineux et du chanvre - **CTIFL** : Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes.

Tableau 1 : Composition du Comité Plénier du CTPS (novembre 2014)

Secteur Public	Secteur Privé
Président du CTPS (Ministère de l'Agriculture)	Vice-Président du CTPS (Représentant des Obtenus)
Secrétaire Général du CTPS (GEVES)	
Président Section (Ministère de l'Agriculture)	3 représentants de l'interprofession (GNIS)
Secrétaire Technique Section (GEVES)	
4 représentants du Ministère de l'Agriculture (3 de la DGAL, 1 de la DGPAAT)	6 représentants des obtenteurs de variétés (UFS)
1 représentant du Ministère de l'Ecologie (CGDD)	
1 représentant du Ministère de l'Economie (DGCCRF)	
Le Directeur de FranceAgriMer	
2 Chefs de département INRA (BAP, SPE)	2 représentants des établissements producteurs de semences ou plants (UFS)
Le Directeur du GEVES	2 représentants des agriculteurs multiplicateurs de semences ou plants (FNAMS)
Le Responsable de l'INOV	
Le Chef du SOC	3 représentants des utilisateurs de semences et plants (1 APCA, 2 AGPB)
Le Contrôleur National SOC Céréales à paille	
11 experts scientifiques	6 représentants des utilisateurs des produits des récoltes obtenues à partir des semences et plants (Malteurs de France, USIPA, ANMF, SNIA, CFSI/SIFP, SYNACOMEX)
	5 représentants des instituts techniques des principales filières végétales (2 Arvalis-Institut du Végétal, IFBM, CFR, ITAB)

Définition des sigles non déjà développés dans le texte de l'article :

APCA : Assemblée Permanente des Chambres d'Agriculture

AGPB : Association Générale des Producteurs de Blé et Autres Céréales -

USIPA : Union des Syndicats des Industries des produits amylacés et de leurs dérivés - **ANMF** : Association Nationale de la Meunerie Française -

SNIA : Syndicat National de l'Industrie de la Nutrition Animale - **CFSI/SIFPAF** :

Comité Français de la Semoulerie Industrielle/Syndicat des Industriels

Fabricants de Pâtes Alimentaires de France - **SYNACOMEX** : Syndicat National

du Commerce d'Exportation des céréales.

Tableau 2 : Composition de la Section Céréales à Paille du CTPS (novembre 2014)

L'orientation du progrès génétique par l'adaptation des règles VATE

Pour les espèces agricoles, les études VATE sont un outil pour orienter le progrès génétique. En effet, la traduction des objectifs de profils des variétés recherchés s'effectue par des objectifs de performance sur des critères de valeur au champ (A) et de valeur d'utilisation (T) combinées à une valeur environnementale (E). Ces objectifs sur chacun des critères sont pris en compte dans un système de cotation qui donne des poids différents aux différents critères. Pour l'évaluation de leur performance, les variétés sont comparées aux variétés du moment largement cultivées, dans des essais réalisés en conditions de représentativité des zones de culture et conduites et en conditions d'expression des caractères (par exemple, étude de la résistance à une maladie dans un essai en contamination artificielle).

Les systèmes de cotation VATE ne sont pas figés, le CTPS les fait évoluer régulièrement pour prendre en compte les progrès de la sélection variétale et les évolutions des besoins et des contextes des différentes filières de production.

• L'exemple du blé tendre

Le blé tendre a été la première espèce en France à faire l'objet d'un règlement technique d'inscription avec cotation VAT en 1952. Depuis cette date, son règlement technique n'a

pas cessé d'évoluer pour s'adapter aux besoins des agriculteurs et des filières.

Productivité, qualité, résistance aux maladies et à certains accidents climatiques ont toujours été pris en compte pour l'inscription, cependant au fil des années, la façon de les prendre en compte a évolué.

Une étape importante est la décision de conduire, depuis 1987, les essais d'inscription avec deux conduites culturales, une conduite dans les conditions normales de culture de la région, une conduite sans traitement fongicide pour permettre aux maladies de s'exprimer. Depuis maintenant plus de 25 ans, la productivité des blés tendres d'hiver est évaluée autant en conditions traitées qu'en conditions non traitées. L'écart de rendement entre les deux conduites, mesurant la tolérance des variétés aux maladies est également pris en compte par un système de bonification et de pénalisation (depuis 1989), un système de bonus/malus est également utilisée pour les résistances par maladies (rouilles, septoriose, oidium, fusariose, mosaïque). Ce règlement d'inscription oblige une sélection importante vis-à-vis de la résistance aux maladies, ceci s'est traduit par un progrès très important dans les situations non traitées, +1,3 q/ha/an entre 1990 et 2000 dans les essais CTPS (Luciani, 2014) car les variétés gagnent en rendement (0,8 q/ha/an) et en résistance aux maladies.

Si la valeur technologique a toujours été prise en compte, il y a eu des évolutions dans les tests utilisés et les classes technologiques. Au début des années 1960, seul le W était considéré pour classer les variétés, des tests plus spécifiques ont été introduits en particulier pour apprécier la valeur en panification française et en biscuiterie. Depuis 1996, les classes technologiques sont les blés améliorants (A), les blés panifiables de bonne qualité (BPS), les blés panifiables courants (BP), les blés biscuitiers (BB), BAU pour les blés à faible valeur en panification, BAU imp pour les blés impanifiables.

Le niveau de rendement exigé pour l'inscription est d'autant plus élevé que la valeur d'usage en panification française est faible. Les seuils de rendement sont depuis 2006 : 80 A, 102 BPS, 104 pour les BP et BB, 107 BAU et 109 pour les impanifiables. Ces différences de seuil sont très incitatives à l'inscription de variétés de bonne valeur technologique. La teneur en protéines a été introduite comme critère décisionnel en 2005, en accordant des bonus aux variétés qui s'écartent positivement de la régression négative existant entre rendement et teneur en protéines (Oury et Godin, 2007).

• Adaptation à des nouvelles zones géographiques de culture : exemple du maïs

L'inscription des variétés de maïs grain par groupe de précocité correspondant à des zones agro-climatiques homogènes a permis la mise sur le marché de variétés diversifiées répondant aux conditions régionales de culture. Les zones de précocité on régulièrement évolué pour aboutir aujourd'hui à 7 zones.

• Adaptation à l'évolution des maladies

Au début des années 1980, l'apparition de la rhizomanie dans les champs de production de betterave sucrière a conduit la Section Betteraves du CTPS à mettre en place une

expérimentation et un règlement technique pour orienter la sélection végétale vers des variétés résistantes, seule alternative à cette maladie virale transmise par un champignon du sol et qui peut entraîner des pertes allant jusqu'à 90% du rendement en sucre.

L'inscription de la première variété Rizor en 1986 a été le début d'une nouvelle rubrique au Catalogue intitulée « variétés résistantes à la rhizomanie » qui au départ était réservée aux champs concernés par la maladie, les variétés résistantes ayant un rendement inférieur de 10 à 15 % aux variétés classiques. Le niveau d'exigence posé par le CTPS pour la résistance à la rhizomanie (les essais étant implantés dans des champs sévèrement infestés, les variétés doivent avoir un niveau élevé de résistance) ont conduit les sélectionneurs, après un temps de réponse, à inscrire partir de 1992 de nouvelles variétés résistantes attendues par les agriculteurs.

Les variétés résistantes à la rhizomanie ont petit à petit comblé le différentiel de rendement avec les variétés classiques pour arriver vers 2001 à des performances équivalentes. En 2007, l'Institut Technique de la Betterave (ITB) a arrêté de recommander les variétés classiques et les dépôts ont cessé dans cette catégorie.

Cet exemple montre parmi d'autres comment le CTPS peut orienter le progrès génétique en permettant à une innovation d'ouvrir la voie à un nouveau type variétal, seule réponse à une maladie qui aurait anéanti la production française.

Aujourd'hui, la réponse à d'autres bioagresseurs du sol comme les nématodes ou le rhizoctone brun passe également par l'innovation variétale et des rubriques au Catalogue qui structurent la commercialisation par segments de marchés.

Le colza a fait également l'objet d'une amélioration significative de sa résistance aux maladies, notamment vis-à-vis du Phoma. Causée par un champignon, cette maladie provoque une nécrose du collet qui peut entraîner des pertes de plusieurs quintaux par hectare. Face à une lutte chimique imparfaite, le CTPS a intégré dès 1986 un seuil éliminatoire des variétés les plus sensibles pour encourager la création de variétés plus résistantes. De nouvelles variétés plus tolérantes sont apparues et à partir de 1995, des bonifications ont été accordées aux variétés résistantes pour compenser un rendement inférieur aux témoins.

• **Adaptation à l'évolution des débouchés**

Face à une demande croissante en huile pour l'alimentation et l'industrie et en protéines pour l'alimentation animale depuis les années 1960, le colza a fait l'objet d'investissements importants en sélection pour proposer de nouvelles variétés et de nouveaux types variétaux pouvant répondre à cette demande. Aux critères de productivité et de résistance aux maladies se sont ajoutés des exigences sur une teneur élevée en huile et en protéines dans les années 1970, l'absence d'acide érucique (1973) puis de glucosinolates (1986). L'arrivée sur le marché de variétés sans acide érucique et à faible teneur en glucosinolates, a permis une meilleure valorisation en alimentation humaine et animale, ce qui a permis l'essor de la culture : entre 1986 et 2007, la surface française est passée de 500 000 ha avec 8 variétés

commercialisées à 1 500 000 ha avec 144 variétés commercialisées.

À partir des années 1990, le CTPS a ouvert progressivement d'autres rubriques en colza sur des profils d'acide gras particuliers répondant à autant d'usages.

En pomme de terre, le CTPS a également mis en œuvre des rubriques pour accompagner la segmentation qualitative du marché. Le Catalogue français différencie depuis 1961 au sein des pommes de terre de consommation, la rubrique « pommes de terre à chair ferme ». Cette dernière catégorie, spécifique au Catalogue français, est appréciée par le marché et par certains obtenteurs étrangers qui viennent « ré-inscrire » leurs variétés inscrites au Catalogue communautaire pour bénéficier du caractère « chair ferme » demandé par les consommateurs.

En orge brassicole, une variété a été inscrite en 2004 en dérogeant à l'index de cotation car malgré son niveau de rendement inférieur aux variétés classiques, elle apportait une caractéristique nouvelle, à savoir un faible niveau de teneur en lipoxygénase, composant à l'origine du trouble dans la bière. La reconnaissance de ce caractère permet aujourd'hui l'inscription de plusieurs variétés avec ce type de profil technologique particulier et des performances agronomiques satisfaisantes.

À partir des années 1970, un marché « maïs fourrage » s'est développé avec la création de types variétaux à forte production de matière sèche plante entière se démarquant ainsi du type grain classique. Le CTPS s'est adapté à cette seconde grande utilisation du maïs en ouvrant en 1985 une rubrique spécifique « maïs fourrage » au Catalogue avec au départ deux groupes de précocité (trois groupes depuis 1990) mais également avec des usages mixtes « grain » et « fourrage » dans des zones de recouvrement de systèmes de production pour des exploitations mixtes. La prise en compte à partir de 1996 de critère de digestibilité à l'inscription a permis de proposer des variétés dont la mention fourrage garanti à l'éleveur un minimum de valeur énergétique de la plante entière (UFL/kg MS).

La segmentation en maïs grain a été moins significative. On peut cependant citer le maïs waxy pour l'utilisation en amidonnerie, le maïs blanc ou le maïs à haute teneur en huile, caractéristiques qui font l'objet d'inscriptions régulières au Catalogue dans des rubriques spécifiques.

L'ensemble de ces exemples montre une évolution régulière des règles VATE permettant ainsi une orientation du progrès génétique sur le moyen et long terme afin d'offrir des variétés adaptées à des conditions pédoclimatiques et à des conduites culturales diversifiées tout en répondant aux besoins des marchés intérieurs mais aussi à l'export. Autant de leviers à actionner de manière équilibrée.

Une évolution également au niveau des critères DHS

Selon les secteurs de production et les enjeux, le CTPS propose des autorisations de marché avec différents niveaux d'exigence correspondant à autant de listes dans le Catalogue Officiel.

Les listes suivantes sont parmi les plus importantes :

Pour les espèces agricoles avec études DHS et VATE,

- La liste A : Variétés ayant satisfait aux épreuves DHS et VATE et dont les semences peuvent donc être multipliées et commercialisées en France et par extension dans l'Union Européenne
- La liste B : Variétés ayant satisfait aux épreuves DHS et dont les semences peuvent donc être multipliées en France en vue de leur exportation hors de l'Union Européenne.

Pour les espèces potagères avec seulement études DHS,

- La liste a : Variétés dont les semences peuvent être, soit certifiées en tant que semences de base ou semences certifiées, soit contrôlées en tant que semences standards, et commercialisables en France et par extension dans l'Union Européenne
- La liste b : Variétés dont les semences ne peuvent être contrôlées qu'en tant que semences standards, et commercialisables en France et par extension dans l'Union Européenne.

D'autres listes ont été créées récemment (2009), en espèces potagères en particulier, avec des niveaux d'exigence DHS moindre. On peut sectoriser le marché des semences potagères en trois groupes d'utilisateurs aux attentes bien différentes (Boulineau, 2011). Deux de ces groupes sont d'importance économique assez proche : variétés pour professionnels et variétés pour jardiniers amateurs. Le troisième est plus émergent : variétés pour passionnés de la diversité et conservateurs de variétés anciennes.

Si le maraîcher professionnel et le conserveur industriel souhaitent des variétés modernes aux rendements élevés, à l'homogénéité élevée et au produit récolté « zéro défaut », il en est tout autrement du jardinier amateur qui recherche lui plutôt des variétés anciennes, à connotation culturelle forte (cultiver la variété de son grand-père) et pour qui l'homogénéité n'est pas forcément recherchée.

Pour répondre aux attentes de ces trois groupes, une seule réglementation existait avec une homologation des variétés soit en liste a soit en liste b. En 2009, suite à une directive européenne, deux nouvelles listes particulières ont été créées :

- Liste d : variétés dites « sans valeur intrinsèque pour la production » de légumes (marché amateurs). Cette liste a repris en fait la plupart des variétés d'une liste précurseur créée en France en 1995 qui s'appelait « variétés anciennes d'amateurs ». En France, cette liste comporte aujourd'hui plus de 350 variétés potagères.
- Liste c : variétés de conservation c'est-à-dire des variétés anciennes cultivées traditionnellement dans des régions spécifiques et menacées d'érosion génétique (passionnés de la biodiversité, collectionneurs de variétés anciennes). En grandes cultures, ce type de liste existe également sous la forme d'une liste C. À ce jour, les listes c et C ne représentent qu'une douzaine de variétés.

Ainsi, ces nouvelles listes permettent de mieux répondre aux attentes des différents utilisateurs, surtout qu'un passage entre ces différentes listes est toujours possible. La grande majorité des variétés inscrites actuellement en liste d est directement issue des réseaux de conservation de ressources génétiques. Certaines variétés de la liste d ayant

trouvé un intérêt économique sur le marché professionnel, elles ont été admises en liste a après vérification qu'elles répondaient bien aux exigences DHS de cette liste (variétés de tomate Noire de Crimée et Ananas, transférées en liste a en 2010). Inversement, des variétés n'ayant plus d'intérêt sur le marché professionnel peuvent être reclassées des listes a ou b vers la liste d, voire en liste c, si elles conservent un intérêt suffisant. Dans le cas contraire, elles seront introduites dans les réseaux de ressources génétiques existants si leur histoire ou leurs caractéristiques le justifient.

Dans les autres espèces cataloguées (vigne et fruitiers), le CTPS a également mis en place différents types de liste correspondant à autant de types de marchés.

Avec ces nouvelles réglementations, les autorisations de mise en marché se font plus en adéquation avec les attentes de chaque secteur, ce qui devrait permettre à tout un chacun de se mettre en conformité avec la loi qui n'a pour seul et unique but que d'assurer à l'utilisateur final l'obtention de semences saines, loyales et marchandes pour l'utilisation qu'il veut en faire.

Le Catalogue : une offre variétale croissante et sans cesse renouvelée

En plantes agricoles, sur 900 à 1000 nouvelles variétés candidates déposées par an, seulement 20 à 30% de variétés satisfont aux études VATE et sont proposées à l'inscription au Catalogue si elles satisfont dans le même temps aux études DHS.

En plantes potagères, 70 à 75% des variétés déposées satisfont in fine aux études DHS.

Aujourd'hui, le Catalogue Officiel français est constitué de plus de 9000 variétés de 250 espèces différentes, réparties en 4800 variétés d'espèces agricoles, 2900 variétés d'espèces potagères. Le Catalogue Officiel des espèces fruitières, quant à lui, représente 1400 variétés dont 200 variétés anciennes d'amateurs. Somme des catalogues des 28 Etats membres, le Catalogue européen répertorie près de 41.000 variétés dont 21.000 d'espèces agricoles et 20.000 variétés d'espèces potagères.

Comme le montre le tableau 3, toutes espèces agricoles et potagères comprises, entre 1960 et 2010, ce sont près de 14 000 variétés qui ont été inscrites au Catalogue Officiel sur les listes A et a, 3 500 variétés sur les listes B et b soit un total de près de 18 000 variétés. Même si une moyenne sur 50 ans cache inévitablement des différences entre espèces et entre périodes, environ 340 variétés ont été inscrites en moyenne par an entre 1960 et 2010.

Pour une espèce donnée, la situation du Catalogue à un temps « t » peut également permettre d'appréhender l'offre variétale disponible et l'effort de création variétale fourni. Le tableau 4 indique le nombre de variétés inscrites au Catalogue Officiel à certaines dates choisies au cours de ces cinquante dernières années en maïs et laitue. L'accroissement significatif de l'offre sur ces deux espèces indique ainsi les efforts accomplis en matière de création variétale. En maïs, la baisse constatée entre 2000 et 2010 est certainement due à une gestion plus optimale des portefeuilles de variétés par les entreprises mais peut être également due à un accroissement du nombre de variétés inscrites ailleurs en Europe

sur certains segments de marchés en défaveur des variétés du Catalogue français.

Groupe espèces	Liste A(a)	Liste B(b)	Total	Moy/an
Betterave & Chicorée Ind.	1050	160	1210	24
Céréales à paille	2115	425	2540	50
Colza & autres Crucifères	390	170	560	11
Lin & Chanvre	100	15	115	2
Maïs & Sorgho	2675	1260	3935	77
Fourrages & Gazons	1430	155	1585	31
Potagères & Maraichères	4520	990	5510	108
Protéagineux	315	45	360	7
Pomme de terre	310	25	335	7
Tournesol & Soja	780	310	1090	21
Vigne	45		45	1
Total	13730	3555	17285	339

Tableau 3 : Variétés inscrites de 1960 à 2010

Année	1970	1990	2000	2010
Maïs	60	550	1290	980
Laitue	80	140	250	420

Tableau 4 : Nombre de variétés au Catalogue Officiel français à 4 temps t

La prise en compte de nouveaux défis par le CTPS : le plan Semences et Agriculture Durable (S&AD)

Comme expliqué en première partie, les sections du CTPS sous l'impulsion du Comité Plénier et des commissions d'experts ont régulièrement adapté les règlements aux attentes des filières et aux avancées de la sélection, en ayant en permanence le souci d'avoir une vision prospective sur l'évolution de l'agriculture et de son contexte. Le CTPS continue aujourd'hui de prendre en compte les enjeux d'avenir : nécessité d'accroître la production pour répondre à une demande mondiale croissante, systèmes de culture moins consommateurs d'intrants phytosanitaires, d'engrais de synthèse ou d'eau dans la logique du Grenelle de l'Environnement et du Plan Ecophyto, adaptation au changement climatique, demandes accrues des consommateurs en termes de santé et qualité nutritionnelle des aliments, maintien de la biodiversité...

Prenant en compte ces enjeux, le Plan S&AD a été élaboré en 2009/2010 et remis par Paul VIALLE, alors Président du CTPS, au Ministre de l'Agriculture en mai 2011 (Vialle, 2011). Organisé en 7 axes (tableau 5), il propose des actions à mettre en œuvre dans le secteur semences pour le développement d'une agriculture performante sur le plan économique et sur le plan environnemental. Ce plan S&AD est aujourd'hui inclus dans le projet agroécologique porté par le Ministère. Dans le plan S&AD, le CTPS est particulièrement concerné par l'élargissement de la VAT à la VATE et par l'évolution de l'accès au catalogue.

AXE 1	Clarifier les modalités de conservation et de diffusion des ressources phylogénétiques
AXE 2	Rendre l'information relative aux propriétés intellectuelles apportée à l'utilisateur accessible et complète
AXE 3	Faire évoluer les conditions d'accès possible et de maintien au Catalogue des variétés
AXE 4	Orienter le progrès génétique vers des variétés adaptées à des conduites culturales diversifiées et permettant de répondre à la réduction des intrants
AXE 5	Garantir l'adéquation du système de contrôle et de certification avec les objectifs des politiques publiques
AXE 6	Élargir la gouvernance du dispositif d'orientation de la politique des semences au sein du CTPS
AXE 7	Promotion de l'approche française dans le contexte de la révision du cadre communautaire

Tableau 5 : Les axes du Plan Semences et Agriculture Durable (Vialle, 2011)

L'axe de la VATE

L'axe 4 du plan S&AD est dédié à l'élargissement de la VAT à la VATE ou « comment orienter le progrès génétique vers des variétés adaptées à des conduites diversifiées et permettant de répondre à la réduction des intrants ».

Fruit d'une analyse stratégique conduite par l'ensemble des 14 sections du CTPS, cette nouvelle impulsion pour une meilleure prise en compte de la dimension environnementale dans l'évaluation des variétés a fait l'objet par section de la mise en place d'un plan d'actions opérationnel qui guide dorénavant les Sections pour faire évoluer leurs règlements techniques d'inscription et leurs dispositifs expérimentaux vers ces nouveaux objectifs.

• Résistance aux bioagresseurs

Les différentes sections ont été amenées à effectuer un diagnostic et une expertise sur le renforcement de la prise en compte des résistances aux bioagresseurs.

• Des critères qui mobilisent déjà des moyens significatifs

Toutes espèces confondues, la prise en compte de la résistance aux bioagresseurs est déjà ancienne et conséquente. Outre les notations de résistances aux maladies et ravageurs réalisées dans les essais de VATE, de nombreux essais en conditions contrôlées sont réalisés. Ce sont près de 45 couples hôtes pathogènes qui sont testés dont 31 dans des essais inoculés au champ. Des tests ont également lieu en laboratoire dans des modules climatiques : 40 couples hôtes pathogènes, 80 couples hôte/race de bioagresseurs. Au champ, les tests sont essentiellement réalisés pour les grandes cultures dans le cadre de la VATE, alors qu'en laboratoire, il s'agit de l'étude de caractères supplémentaires pour la distinction dans le cadre des épreuves DHS, essentiellement pour les espèces potagères.

Ainsi, aujourd'hui, sur les 2000 cycles annuels d'étude VATE réalisés par le GEVES, près d'un quart concerne spécifiquement des cycles bioagresseurs. Il faut noter également que des espèces telles que l'avoine, le maïs et le sorgho sont expérimentées en l'absence de protection fongicide, ce qui a exercé une pression de sélection indirecte sur les résistances aux maladies.

- **De nouveaux tests de résistance à des bioagresseurs**

Les sections ont identifié les nouvelles maladies et les nouveaux ravageurs sur lesquels il serait pertinent d'avoir une évaluation de la tolérance des nouvelles variétés. Pour certains couples espèces/bioagresseurs (par exemple, cécidomyies orange en blé tendre, hernie du chou en colza, aphomyces en pois...), des protocoles d'évaluation ont d'ores et déjà été mis en place alors que pour d'autres couples des actions de recherche méthodologique sont conduites pour mettre au point les processus d'évaluation (sclerotinia du colza, mosaïques de l'orge).

La question de la durabilité des résistances aux maladies a aussi été largement abordée, tant en matière d'actualisation des notes de résistances, réalisées par les instituts techniques dans le cadre du continuum d'expérimentation de pré/post-inscription que de construction génétique de ces résistances et du pilotage de la durabilité des résistances dans le temps et dans l'espace.

- **Une évolution de la conduite des essais d'évaluation**

Un des exemples les plus aboutis de renforcement de la prise en compte de la résistance des nouvelles variétés par rapport aux bioagresseurs est le cas des maladies sur feuillage en betterave sucrière.

Depuis la campagne 2010, sur chacune des 19 plateformes d'essais VATE, à côté des essais rendement, la dynamique d'apparition des quatre principales maladies du feuillage (cercosporiose, oïdium, ramulariose, rouille) est suivie sur des variétés témoins en bordure des essais (www.geves.fr). Selon l'apparition des maladies sur ces témoins, les traitements fongicides des essais sont réalisés en suivant les seuils « IPM » (Indice de Pression Maladie) définis par l'ITB. Les variétés utilisées pour le suivi des maladies ont été choisies au vu de leur faible sensibilité par rapport aux maladies pour lesquelles elles vont être l'indicateur de déclenchement du traitement. Le traitement est ainsi normalement appliqué plus tard que si son déclenchement avait été basé sur une variété de sensibilité moyenne à élever : l'objectif est de pénaliser les variétés les plus sensibles dans les essais. Depuis qu'il a été mis en place, le dispositif de déclenchement raisonné des traitements fongicides a permis de réduire sensiblement le nombre moyen de traitements. Avant 2010, le nombre de traitements dans les essais CTPS était supérieur au nombre moyen de traitements recommandés par l'ITB dans son réseau d'observation RESOBET FONGI. A partir de 2010, le nombre de traitements du réseau CTPS est proche et même légèrement inférieur à ce qui est recommandé en culture, sauf lors de la campagne 2013. Ce nombre en 2013 (1,11) reste toutefois faible comparativement à la situation avant le nouveau protocole : 2,29 en 2008.

D'une manière globale, l'état sanitaire des essais est satisfaisant, mais avec ce nouveau protocole, contrairement aux années précédentes où l'on recherchait une protection maximale pour sécuriser les essais, des symptômes maladies peuvent apparaître dans les essais, sur les variétés les plus sensibles sans compromettre la qualité de l'essai agronomique. La mise en place de ce dispositif et des notations nouvelles a également permis d'améliorer la précision du

suivi de la dynamique des maladies foliaires. Depuis, on peut aussi remarquer l'inscription de quelques variétés ayant un bon comportement pour plusieurs maladies du feuillage ; l'une de ces variétés, récemment inscrite, a été proposée comme témoin de déclenchement pour les 4 principales maladies en 2014 (alors qu'en 2010, 3 variétés étaient nécessaires).

- **Une évolution de la cotation des variétés**

En plus du protocole, certaines sections CTPS ont fait évoluer leurs règles d'inscription. Par exemple, en pomme de terre, l'inscription est basée sur un index multicritères où le rendement des candidates est comparé aux témoins, des bonus ou malus étant ensuite attribués selon 10 caractères d'utilisation ainsi que 14 caractères de résistances aux bioagresseurs et de sensibilités aux accidents physiologiques. L'index de cotation intègre en plus depuis 2014 une note environnementale attribuée selon la potentielle diminution du nombre de traitements nématicides et fongicides apportée par une double résistance à 2 espèces de nématodes et/ou une résistance au mildiou du feuillage et du tubercule. Dans l'index, cette note environnementale a un poids équivalent par exemple au caractère qualité gustative. En lin, le règlement technique d'inscription a été modifié pour inclure des bonifications ou pénalités selon la résistance à la fusariose et à l'oïdium.

- **Efficience en eau**

Compte tenu notamment de la multiplication attendue des périodes de sécheresse liées au changement climatique et de l'accroissement des contraintes réglementaires d'accès à la ressource en eau, pour certaines espèces, il a été jugé prioritaire de favoriser l'inscription de variétés plus efficientes en eau.

Sur l'espèce sorgho grain, les réseaux d'expérimentation des variétés demi-précoces et demi-tardives à tardives sont subdivisés depuis 2006 en deux sous-réseaux suite au constat d'un trop grand nombre d'essais réalisés en situations trop bien pourvues en eau. L'un est normalement conduit pour une culture de sorgho (1 à 2 irrigations maximum), l'autre suit un itinéraire limitant (pas d'irrigation, densité plus faible et apport d'azote limité). La règle de décision pour l'inscription tient compte du comportement des variétés dans ces deux types de conduite c'est-à-dire qu'une variété, pour être inscrite, doit dépasser un certain seuil de rendement dans une conduite tout en n'étant pas trop faible dans le second itinéraire. La totalité du réseau des variétés très précoces est par ailleurs conduite sans irrigation. Cette stratégie montre néanmoins quelques limites en années à bonne pluviométrie estivale et du fait de synthèses d'essais réalisées sur de faibles nombres d'essais ce qui limite la puissance de l'information.

En maïs, la Section a proposé de rééquilibrer la géométrie du réseau pour augmenter lorsque cela se justifiait la proportion d'essais sous contrainte hydrique afin de pouvoir repérer les variétés adaptées à ces situations. Elle a donc demandé à ce que les essais mis en place soient qualifiés a priori lors de la définition du réseau. Le niveau attendu et prévisible de contrainte hydrique est donc défini lors de la définition des lieux d'expérimentation de l'année. Trois ni-

veaux ont été définis. La connaissance des lieux est en général plutôt correcte. En effet, sur les 263 essais mis en place en 2011, 245 faisaient déjà partie du réseau en 2010. Lorsque des méthodes fiables et réalisables seront disponibles, il est prévu d'évaluer de façon plus fine le niveau de stress observé sur les essais. Les observations des expérimentateurs et des ingénieurs régionaux du GEVES et les niveaux de rendement observés permettront de valider ou non le classement des essais selon les 3 catégories.

- **Efficience en azote**

L'efficience en azote a également été jugée comme prioritaire pour plusieurs espèces. Trois stratégies sont développées, l'une concerne explicitement la prise en compte de critères d'efficience de l'azote dans des essais spécifiques, la deuxième l'application d'une pression d'évaluation des variétés par le pilotage des apports en azote et la troisième la caractérisation des statuts en azote des essais afin de valoriser les interactions génotypeXenvironnementXconduite (IGEC).

La Section Céréales à paille met en œuvre depuis l'automne 2012 un dispositif dédié de réponse à la dose d'azote des variétés de blé tendre afin de valoriser les variétés à bonne efficience en azote tant du point de vue du rendement que de la concentration en protéines. Avec ce dispositif, l'ensemble des variétés candidates sont testées dans 4 lieux conduits selon 3 modalités : 2 répétitions à la dose d'azote recommandée N, 2 répétitions à N-80, 2 répétitions à N+40.

Depuis la campagne 2013, la Section Colza a validé la diminution des apports azotés de 20 unités sur les plateformes d'essais par rapport à la dose préconisée par la méthode du bilan. L'objectif est de pénaliser les variétés mal adaptées à des conditions restrictives en azote. Cette section a également ouvert la possibilité d'une expérimentation spéciale à la demande et à la charge du déposant, pour qualifier l'efficience d'une variété par rapport à l'azote avec un dispositif semblable à celui mis en place en blé tendre.

En betterave sucrière, depuis la campagne 2010, un module de contrôle azote est mis en place sur chaque plateforme : 1 variété témoin avec 3 doses d'azote (zéro azote, dose conseillée par l'OAD Azofert, DC + 40). Ce module a deux objectifs : s'assurer qu'il n'y a pas d'excès de fertilisation et donner en fin de campagne une appréciation du statut azoté de chaque plateforme, ce qui permet de classer les différents milieux et d'étudier les différences de classement des variétés entre les différentes classes d'environnement. Cette classification des environnements serait perfectible via l'utilisation d'outils permettant de calculer a posteriori la fourniture d'azote par le sol en fonction du climat réel.

- **Autres intrants**

Les discussions VATE ont permis d'avoir des débats très larges sur le rôle de levier que peut constituer le facteur génétique pour diminuer la dépendance aux intrants. Ainsi, par rapport aux herbicides, certaines Sections explorent actuellement la possibilité de différencier la pouvoir couvrant des variétés. Des notations sur le port au tallage sont effectuées en DHS blé tendre, elles sont notamment valorisées dans les épreuves en agriculture biologique. En pois

protéagineux, le pouvoir couvrant est estimé par analyses d'images : l'information est diffusée depuis 2013.

Autre exemple : en gazon, un protocole pour évaluer les différences en quantité de déchets de tonte sera mis en place en 2015 pour permettre d'estimer en routine et de manière simple et précise la production de déchets de tonte. La réduction de ces déchets est en effet un élément important pour les utilisateurs et permet de limiter les impacts environnementaux et économiques liés à leur élimination.

- **IGEC et continuum**

L'ensemble des exemples présentés ci-dessus illustre la diversité des approches qui sont nécessairement différentes selon les espèces car elles doivent intégrer les caractéristiques et les contraintes de chaque filière. Au-delà des spécificités de l'évaluation de tel critère sur telle ou telle espèce, une stratégie incontournable est la nécessité d'interpréter plus finement les IGEC dans les réseaux d'essais quelle que soit l'espèce pour mieux connaître les réponses adaptatives des variétés aux principaux stress environnementaux.

Quelle que soit la modalité d'analyse des IGEC retenue, la qualité des résultats dépend fortement de la capacité à décrire correctement et de manière dynamique le niveau des facteurs biotiques et abiotiques de l'environnement affectant le comportement des variétés. Or, les réseaux CTPS présentent un grand nombre d'essais, réalisés par une grande diversité d'acteurs souvent en dehors des stations de recherche. Ainsi, la caractérisation des conditions environnementales rencontrées par les variétés chaque année au sein des différents sites d'essais est hétérogène et souvent sommaire voire inexistante. Le défi de la caractérisation des environnements d'essais est donc important et une étape préalable avant toute avancée sur les modèles d'analyse des IGEC. Ce travail est d'autant plus indispensable qu'il permettra de réaliser un diagnostic agronomique sur les réseaux susceptibles de donner des éléments d'orientation pour repenser, si nécessaire, la géométrie des réseaux en termes aussi bien de pratiques culturales que de représentativité d'une diversité de conditions pédoclimatiques.

Par ailleurs, les épreuves d'inscription se limitent à 2-3 années. Or, nous savons que les conditions de culture de l'année peuvent affecter fortement la performance des variétés, l'effet année étant la première source des IGEC. La durée des épreuves d'inscription est donc probablement insuffisante pour caractériser finement une variété. Il serait donc opportun de pouvoir bénéficier des informations déjà existantes sur les variétés et détenues par les obtenteurs. De même, il serait utile pour les instituts techniques en charge de l'évaluation en post-inscription de disposer de l'information acquise au niveau du CTPS et chez les obtenteurs. Favoriser la continuité d'informations entre les différentes étapes du continuum de connaissance des variétés est donc un enjeu majeur qui a été pris en compte par le CTPS en mettant en place en 2013 la charte de mise à disposition des données CTPS.

- **Nouveaux usages**

Le CTPS est amené régulièrement à réfléchir à l'évaluation de l'aptitude des variétés pour un usage autre que celui

habituellement connu (cf. évolution en maïs dans les années 1970-1980). En lien avec la démarche VATE, le CTPS a mis en place en 2014 une Commission VATE inter-Sections chargée d'évaluer les variétés pour un usage autre que culture de rente : il s'agit de plantes de services qui recouvrent les plantes d'intercultures, les plantes compagnes ou les couverts pérennes avec lesquels une culture de rente est cultivée.

« L'accessibilité au Catalogue »

En 2011, deux variétés de blé tendre ont été inscrites au Catalogue Officiel sur la base du réseau classique « traité/non traité » et d'un réseau d'essais conduits en agriculture biologique dans le cadre d'un partenariat avec l'Institut Technique de l'Agriculture Biologique (ITAB). La Section Céréales du CTPS a entériné en 2013 un dispositif pérenne, en termes de réseaux d'essais et de protocole d'étude, afin de pouvoir instruire dans le cadre de la liste unique A des « variétés adaptées aux conditions de l'agriculture biologique ».

Pour faciliter l'accessibilité au Catalogue français de variétés anciennes ont été créées les listes C et c des variétés de conservation dont les droits d'inscription sont actuellement pris en charge par le Ministère de l'Agriculture et la liste d (ex variétés anciennes d'amateurs en potagères) dont les droits d'inscription pourront être pris en charge par le GNIS. Toutes ces évolutions des règles nationales d'inscription doivent tenir compte des capacités d'innovation à court et moyen terme et du contexte réglementaire européen dans lequel elles évoluent. Un catalogue national trop restrictif conduirait en effet à une fuite des nouvelles variétés vers les autres catalogues nationaux des pays de l'Union Européenne et à leur retour en culture sur le territoire national sans disposer des données d'évaluation aujourd'hui apportées par les épreuves nationales VATE.

Conclusion

Depuis sa création, le CTPS a fait évoluer, de manière constante et régulière, les conditions d'accès des nouvelles variétés au Catalogue Officiel, en étant à l'écoute des besoins des filières et en prenant en compte les capacités d'innovation des obtenteurs.

Il doit notamment cette capacité d'adaptation à son fonctionnement unique en Europe et qui fait ses preuves depuis plus de 70 ans : permettre à l'ensemble des acteurs publics et privés de cogérer une réglementation « Catalogue » et « Certification » au service de l'agriculture et adaptée aux exigences du moment en s'appuyant sur les connaissances scientifiques et techniques, l'expertise et la compétence de tous ses experts (près de 800 toutes filières confondues).

À chaque fois, chaque section CTPS a entendu ou anticipé les demandes en faisant évoluer ses règles de décisions pour permettre à de nouvelles innovations variétales d'accéder au Catalogue tout en veillant à la poursuite du progrès génétique sur les autres critères.

Les évolutions du Plan Semences et Agriculture Durable, et en particulier la démarche VATE, se situent dans la suite logique de ce qu'a été le fonctionnement historique du CTPS, à savoir une évolution pas à pas des leviers d'orientation du progrès génétique. La démarche VATE ren-

force ce système d'accompagnement et d'orientation du progrès génétique, pour prendre en compte les enjeux d'avenir, et en particulier l'exigence d'une agriculture visant la double performance économique et environnementale. Le CTPS continuera à s'adapter aux progrès attendus de la sélection, tel qu'il le fait par exemple actuellement sur des critères tels que l'efficacité en eau ou en azote des variétés. L'offre variétale du Catalogue Officiel est large et diverse. Cette diversité sera d'autant plus disponible et valorisée que l'ensemble des acteurs des filières aura intégré pleinement le choix variétal comme une composante essentielle de ses critères de décision, depuis les conduites culturales jusqu'à la mise à disposition du produit fini au consommateur final, en passant par les choix des circuits de la distribution des semences et le conseil technique à l'agriculteur.

Bibliographie

Boulineau, F., 2011. Des variétés professionnelles aux ressources génétiques : évolutions réglementaires récentes pour répondre aux attentes de la filière semences et aux orientations du Grenelle de l'environnement. *Les Rencontres du Végétal*. 10, 11 janvier 2011. Angers

Luciani, A., 2004. Etude du progrès génétique chez différentes espèces de grande culture. *Rapport de l'étude réalisée par le GEVES pour le compte du Comité technique Permanent de la Sélection*, Septembre 2004, 181 pp. + annexes

Oury FX et Godin C (2007). Yield and grain protein concentration in bread wheat: how to use the negative relationship between the two characters to identify favourable genotypes. *Euphytica*, 157, 45-57

Vialle P., 2011. Rapport Semences et agriculture durable. http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/110525-RC-rapport_SAD-version_restituee.pdf. 177 pp

www.geves.fr : téléchargement des Règlements techniques d'inscription ainsi que des Protocoles VATE et DHS

Étude préliminaire à la caractérisation du comportement des variétés de colza oléagineux d'hiver dans des itinéraires techniques particuliers sur la base du réseau CTPS existant³

Patrick BAGOT^{1*} - Frédéric SALVI²
Julie GOMBERT¹

¹GEVES - 25 rue Georges Morel - CS 90024 - 49071 Beaucouzé Cedex - France

²CETIOM - Campus Inra/AgroParisTech - Avenue Lucien Brétignières, 78850 THIVERVAL GRIGNON

*Auteur correspondant : patrick.bagot@geves.fr

Résumé

L'un des principaux objectifs fixés par le groupe « Adopter des modes de production et de consommation durables » réuni lors du Grenelle de l'environnement, est de promouvoir des variétés végétales qui manifestent une faible dépendance vis-à-vis des intrants.

Pour réfléchir à comment atteindre cet objectif, un groupe de travail a été mis en place au sein de la section du Comité Technique et Permanent de la Sélection (CTPS) colza et autres crucifères. Ce groupe de travail, réunissant les partenaires de la filière a estimé qu'afin d'approfondir cette problématique complexe, un travail important sur les données disponibles au sein du Groupement d'Etude et de contrôle des Variétés et des Semences (GEVES), confrontées à celles du CETIOM, devait être initié. L'objectif de cette démarche, dans un premier temps, a été de faire l'état des lieux de la variabilité intrasèque du réseau d'essais, tant en matière de zones agropédoclimatiques, que de types d'itinéraires techniques rencontrés.

Le réseau d'essais mis en place dans le cadre des études de Valeur Agronomiques Technologiques et Environnementale (VATE) est composé d'une vingtaine de plateformes. Il est implanté majoritairement sur la diagonale Charentes - Lorraine, zone de culture principale du colza en France. Il répond tout à fait à son double objectif de recherche de situations pédoclimatiques contrastées conjoint à une bonne représentativité des différents bassins de production.

Les chiffres moyens et la distribution des indices de fréquence de traitement (IFT) selon leur catégorie ainsi que la diversité de situations rencontrées sur les lieux d'essais se sont révélés très concordant avec les pratiques nationales moyennes. Le niveau moyen de la protection des cultures au sein du réseau d'évaluation est de niveau 1 soit « raisonné » selon la classification Ecophyto R&D. Les pratiques de fertilisation rencontrées sont tout à fait conformes et dans la forme et dans les doses aux pratiques nationales. Les itinéraires techniques (ITK) dans le réseau ne sont pas uniformes et reflètent au mieux et sous contrainte d'expérimentation variétale, la diversité des pratiques françaises.

Pour caractériser les milieux, la recherche d'indicateurs s'est essentiellement axée sur les stress abiotiques.

L'utilisation conjointe d'un modèle (AZODYN) et d'un outil de dia-

gnostic (DIACOL) a permis de caractériser les situations en termes de statut azoté et de stress climatiques a posteriori. Les indicateurs en sortie des deux outils concordent assez bien entre eux et avec le dire d'experts pour l'année étudiée, année atypique marquée par un fort stress hydrique printanier, induisant un stress azoté.

La recherche d'indicateurs de comportement variétal s'est essentiellement axée sur l'analyse des Interactions x Géotypes x Environnement x Conduite (IGEC). La méthode d'analyse AMMI s'est révélée capable de ségréger les différents comportements variétaux et les différentes situations environnementales (4 ou 5 selon les séries d'essais) rencontrées sans pour cela les expliquer. Il a été possible d'identifier l'écovalence comme un indicateur synthétique pour caractériser les niveaux d'interactions environnemental et variétal. La régression PLS a permis d'identifier les facteurs limitants pour l'année testée et surtout de mesurer leurs impacts sur les lieux et les variétés avec une très bonne précision. Cette analyse n'a toutefois pas permis de caractériser les variétés dans des regroupements d'essais par ensemble de facteur limitant, le nombre d'essais étant trop faible.

Mots-clés

Colza, CTPS, réseau d'essais, VATE, IFT, ITK, stress abiotique, Azodyn, INN, Diacol, AMMI, Régression PLS, Ecovalence.

Abstract

One of the main aims selected by the group "Adopting sustainable modes of production and consumptions" gathered during the "Grenelle on the environment", was to promote plant varieties which present a low dependence towards inputs. In order to reach this goal, a workgroup was set up within the section of the Technical and Permanent Committee for Selection (CTPS) for oilseed rape and other crucifers. In order to deepen this complex issue, this workgroup, gathering the partners of the sector, undertook an important work on the available data within the Grouping of Study and Control of the Varieties and Seeds (GEVES), confronted with those of the CETIOM, should be introduced. The objective of this approach was first to establish the current situation of the intrinsic variability of the trial network, in terms of agropedoclimatic areas and technical practices.

The trial network set up within the framework of the studies of Value for Cultivation, Use and Sustainability (VCUS or VATE) is composed of about twenty locations. It is mainly located on the Charente - Lorraine diagonal, which is the main area of oilseed rape production in France. It completely meets its double objective of research for contrasting pedoclimatic situations and good representativeness of the various production areas.

The average figures and the distribution of the Index of Frequency Treatment (IFT) according to the categories as well as the diversity of situations observed on the different locations were really consistent with the national average practices. The average level of the crop protection in the trial network was level 1 or "reasoned" according to the Ecophyto R&D classification. The observed fertilization practices were completely in accordance with the national practices, in terms of technical supply and doses. The technical practices (ITK) in the network were not uniform and represented at best the diversity of the French practices, under constraint of variety testing.

In order to characterize the locations, indicators were looked for and were focused on abiotic stresses. Combination of a model (AZODYN) and a tool of diagnosis (DIACOL) was used to characterize the situations in climate terms and nitrogen status (relative N Concentration) a posteriori. Output indicators of both tools matched well enough between them and between to the experts thinking for the studied year, which had been atypical and marked by a strong spring water stress, leading a nitrogen stress.

The researched indicators of variety behavior were mainly focused on the analysis of the Interactions x Genotypes x Environment x Practices (IGEC). The Additive Main effect and Multiplicative Inter-

³ Article dont la première publication a été faite dans la revue Innovations agronomiques (<http://www6.inra.fr/ciag/Revue>), Volume 35 / Mai 2014 (<http://www6.inra.fr/ciag/Revue/Volume-35-Mai-2014>)

action (AMMI) method led to good results to segregate the variety behaviors and the observed environmental situations (4 or 5 according to the trial series) without being able to explain them. Though, it was possible to identify ecovalence as a synthetic indicator to characterize the environmental and varieties levels of interactions. The Partial Least Square regression (PLSR) made it possible to identify limiting factors for the tested year and especially to measure their impacts on the locations and varieties with a very good precision. However, this analysis did not permit to characterize the varieties in the locations with the same limiting factors, the trial number for each situation being too low.

Key-words

Oilseed rape, CTPS, trial network, VCUS, IFT, technical practices, abiotic stress, Azodyn, relative N concentration, Diacol, AMMI, PLS Regression, Ecovalence.

Description analytique du réseau CTPS actuel

L'étude a porté sur les données de 547 essais (sur 593 implantés entre 2005 et 2010) ce qui représente 141 plateformes différenciées sur les 6 campagnes.

Caractérisation géographique des lieux d'essais

Le réseau est composé de 19 à 23 plateformes d'essais par an, réparties sur tous les bassins majeurs de production de colza. Quelques départements sont surreprésentés (Eure-et-Loir et Côte d'Or), d'autres sont non couverts malgré une sole de colza élevée (Eure et Deux-Sèvres). Le réseau s'étend sur la diagonale Charentes - Lorraine bien connue comme étant l'axe majeur de la zone de culture du colza en France. Il répond tout à fait à son double objectif de recherche de situations pédoclimatiques contrastées conjoint à une bonne représentativité des différents bassins de production.

Le réseau étant multipartenaire, les lieux d'expérimentation sont en majorité situés sur des plateformes d'essais menées par les obtenteurs de colza eux-mêmes (60%). Le réseau démontre au fil des ans une bonne stabilité quant aux acteurs présents et aux zones couvertes avec très peu de changements entre années : pas plus de 10% de variation de localisation d'essais. La commission d'experts VATE s'attache tous les ans à ce que cette répartition reste optimale. Chaque nouvelle demande de prise en charge d'essais ou de changement de bassin de production est étudiée au regard des dernières données sur la répartition de la sole française.

Caractérisation des pratiques culturelles

• Pratiques de protection des cultures

Par souci de comparaison avec l'étude Ecophyto R&D 2010, menée à la demande des Ministères en charge de l'agriculture et de l'environnement et coordonnée par l'Inra, mais aussi des sources provenant d'Agreste, nous avons retenu comme indicateur de protection des cultures l'Indice de Fréquence de Traitement (IFT) (Figure 1). Celui-ci a été mis au point au Danemark dans les années 1980. Il est un indicateur synthétique d'intensité d'utilisation des produits phytosanitaires. On le calcule par parcelle, il correspond au nombre de doses homologuées utilisées par campagne et

par hectare. La campagne commence à la récolte du précédent.

	Dose Appliquée * Surface
IFT	Dose Homologuée * Surface
IFT parcelle = Σ IFTs	

Figure 1 : Formule de calcul de l'Indice de Fréquence de Traitement

L'IFT peut se décomposer en quatre catégories de traitement : les molluscicides, les fongicides, les herbicides et les insecticides (Champeaux, 2006). Les IFT par catégorie ainsi qu'un IFT global ont été calculés.

Le rapport Ecophyto démontre que le colza est, parmi les grandes cultures (hors pomme de terre), l'espèce qui présente les IFT les plus forts, traduisant un recours élevé à l'utilisation de produits phytosanitaires pour lutter contre les nombreux ravageurs auxquels il est sensible.

L'analyse des enquêtes « Pratiques culturales » du SCEES sur les campagnes 1994, 2001 et 2006 révèle par ailleurs une augmentation assez régulière de l'IFT depuis 1994, augmentation assez parallèle à la forte progression des surfaces cultivées de colza dans tous les bassins de production (doublement des surfaces).

Les insecticides constituent en France le principal poste de traitement.

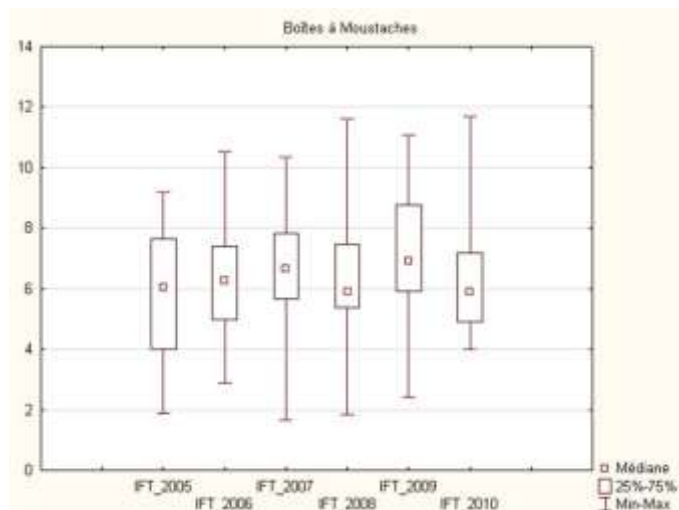


Figure 2 : Distribution de l'IFT Global de 2005 à 2010 dans le réseau CTPS

Dans le réseau d'essai VATE, la variabilité de l'IFT global est élevée au sein d'une même campagne mais reste répétable entre années. L'étude Ecophyto démontrait la même chose entre parcelles de la même zone géographique.

Les valeurs minimales oscillent entre 1.7 et 4 tandis que les valeurs maximales fluctuent entre 9.3 et 11.7. Les IFT moyens (entre 5.7 et 6.8) sont très proches des chiffres issus des sources Agreste pour 2006 (entre 6.1 et 6.9) (Agreste, 2008 ; Agreste Poitou-Charentes, 2008) (Figure 2).

La répartition par catégorie elle aussi reflète les données nationales et on retrouve bien la part insecticides (42-65%) supérieure à la somme des parts fongicides (12-22%) et herbicides (24-27%) (Tableau 1).

Année	IFT Insecti- cides	IFT Herbi- cides	IFT Fongi- cides	IFT Molluscicides	IFT Global
2005	2.5	1.5	1.2	0.5	5.7
2006	3.3	1.3	1.2	0.3	6.2
2007	3.8	1.7	0.9	0.4	6.8
2008	2.8	1.8	1.3	0.8	6.7
2009	3.1	1.6	1.4	0.8	6.8
2010	3.1	1.6	1.5	0.5	6.6
Moyenne	3.1	1.6	1.3	0.6	6.5
Agreste 2006	3.1	1.8	1.1	0.4	6.3

Tableau 1 : IFTs du réseau VATE Colza sur la période 2005-2010 et pratiques nationales

Les chiffres moyens, la distribution des IFTs selon les catégories ainsi que la diversité de situations rencontrées sur les lieux d'essais sont totalement concordants avec les pratiques nationales moyennes. On peut qualifier le niveau moyen de la protection des cultures au sein du réseau d'évaluation comme étant de niveau 1 dit « raisonné » selon la classification Ecophyto R&D.

Les recommandations techniques concernant la protection des cultures des essais VATE doivent s'appuyer sur les conclusions du rapport Ecophyto R&D 2010, notamment en systématisant le raisonnement de la protection à travers l'emploi d'outil d'aide à la décision. Toutefois, il ne faudra pas perdre de vue que le fait d'expérimenter au champ, sur un nombre de lieux limités, des variétés ayant des différences de précocité et de sensibilité aux stress biotiques et abiotiques, dans un but d'homologation sur un catalogue national doit continuer à se faire sans biais trop important et en prenant des risques raisonnés.

• Pratiques de fertilisation

La fertilisation azotée

Année de récolte	Dose N apporté			
	Moyenne	Écartype	Minimum	Maximum
2005	160.7	20.2	120	192
2006	152.8	38.1	50	196
2007	148.2	33.0	76	190
2008	160.7	43.5	16	255
2009	163.7	42.3	60	236
2010	160.8	42.2	40	215
Moyenne	157.8	36.5	60	214

Tableau 2 : Dose moyenne appliquée et variabilité (kg N/ha) dans le cadre du réseau CTPS colza 2005-2010

A partir des données disponibles, c'est-à-dire la dose minérale apportée, nous avons confronté les apports moyens annuels rencontrés sur le réseau par rapport aux données issues des enquêtes bisannuelles menées par le CETIOM sur cette même variable (Tableau 2). La dose moyenne est de 158 kg N/ha, variant de 148 et 164 kg N/ha selon les années. Cette valeur est à rapprocher des 160 kg N/ha observés dans les dernières enquêtes CETIOM. Ces chiffres ne montrent pas de tendance affirmée à la hausse ou à la baisse. Dans les enquêtes sur les pratiques du CETIOM, on note plutôt une légère baisse. 50% des situations centrées sur la médiane se situent entre 140 et 190 kg N/ha.

Après enquête, tous les expérimentateurs, à partir de 2009, calculent la dose totale à apporter en se servant d'outils ou de méthodes telles celle des bilans ou la réglette CETIOM.

Les pratiques rencontrées sont tout à fait conformes dans la forme et dans les doses aux pratiques nationales.

La fertilisation soufrée

La dose moyenne est très stable entre années autour de 75 U/ha, hormis dans une situation où une erreur d'apports (150 U) s'est produite, les préconisations CETIOM sont respectées et la variation d'apport dépend du type d'engrais sélectionné ou disponible (simple ou mixte).

Caractérisation des milieux d'expérimentation

La priorité a été mise sur la caractérisation des stress abiotiques impactant le rendement en graines du colza. Les données disponibles étant des données historiques, peu de covariables étaient utilisables pour permettre de caractériser ces stress.

Après avoir listé tous les outils qui permettraient de simuler ces covariables a posteriori, Azodyn et DIACOL ont été choisis. Ces modèle et outil de diagnostic ont l'avantage de demander des variables d'entrées simples d'accès et en quantités limitées. Une enquête auprès des expérimentateurs a été faite afin de recueillir les variables d'entrée nécessaires au fonctionnement de ces deux outils. Afin d'avoir un jeu de données assez complet et sur un nombre conséquent de lieux, l'étude a été restreinte à l'année 2010 et sur les plateformes présentant des essais avec les variétés de type lignée (15 lieux). 11 plateformes seulement ont pu être caractérisées. Il a fallu estimer quelques variables : les données de sol manquantes ont été récupérées dans la base de données analyses de terre du GIS-SOL, les RU, Hcc, Hpf4.2 calculés avec la formule de Rémy ou de Gras. Les reliquats azotés laissés par le précédent de la culture de colza ont été estimés à partir d'abaques disponibles et les données climatiques fournies par Agroclic (INRA Avignon) ou le CETIOM.

• Caractérisation de la nutrition azotée à l'aide du modèle AZODYN-colza

Pour caractériser les conditions limitantes et non-limitantes en azote, l'indice de nutrition azotée (INN) est généralement utilisé. L'INN est le rapport entre la teneur en azote des parties aériennes mesurée à un moment donné du cycle et la teneur critique fournie par la courbe de dilution. Dans le cadre du réseau, aucune analyse de la teneur en azote des parties aériennes n'a été réalisée, écartant ainsi la possibilité de calculer l'INN. Le modèle de culture à pas de temps journalier, AZODYN, a été utilisé afin de réaliser un bilan azoté a posteriori et ainsi recalculer la cinétique de l'INN tout au long du cycle (Valantin-morison et al, 2004) (Tableau 3).

Lieux		Obj de rdt	Rdt obs	Rdt sim	Sorties Azodyn		
					INN EH	INN SH	INN F1
Inr35	Mordelles	35	53	33.6	1.3	1.0	0.8
Lim77	Crisenoy	50	46	34	0.7	0.6	1.0
Des28	Houville la Branche	40	36	15.3	0.5	0.4	0.4
Mon28	Toury	35	44	25.1	0.7	0.5	0.8
Cau82	Pommevic	38	31	24.9	0.5	0.4	0.7
Inr21	Breteniere	45	44	20.7	0.4	0.4	0.6
Ser59	Houplines	40	43	23.4	0.5	0.6	0.4
Mom02	Prouvais	40	44	24.2	0.6	0.5	0.8
Cet54	Martincourt	35	39	18.4	0.5	0.4	0.7
Eur41	Selommes	40	49	32.1	0.9	0.7	0.9
Mai85	St Martin de Fraigneau	40	40	17	0.4	0.6	0.6

Tableau 3 : Indices de nutrition azotée simulés par plateforme par stade

L'INN Entrée Hiver est compris entre 0.4 et 0.7 à l'exception de deux lieux non stressés : Mordelles INN>1.2 et Selommes INN=0.9.

Même si les carences azotées à l'automne ne sont pas préjudiciables (Colnenne, 1999), l'INN Entrée Hiver est tout de même informatif car il permet de discriminer des situations de nutrition azotée contrastées au sein du réseau.

L'INN F1 présente une variabilité importante au cours des 10 jours encadrant le début de la floraison, ce qui conforte notre choix de calculer l'INN à F1. Les INN F1 de la campagne 2010 varient de 0.4 à 1 selon les plateformes mettant ainsi en évidence des situations de nutrition azotée très contrastées au sein du réseau. Ces situations ont bien été identifiées comme telles par les dires d'experts.

• Caractérisation des facteurs limitants climatiques à l'aide d'un outil de diagnostic agronomique, DIACOL

DIACOL (DIAGnostic COLza) est une méthode de diagnostic agronomique développée par le CETIOM. Dans le cadre du travail de caractérisation du réseau CTPS sur les campagnes 2005 à 2010, le CETIOM a adapté la méthode pour une utilisation *a posteriori* conduisant à étudier exclusivement les effets climatiques. Ainsi, DIACOL permet une caractérisation des facteurs limitants d'origine climatique. Son utilisation requiert des données météorologiques journalières (tempé-

rature, rayonnement, précipitations, évaporation et irrigation), pédologiques (type de sol et réserve utile) et phénologiques (dates de levée, d'arrêt de végétation, de début et fin de floraison ainsi que l'état de la culture en entrée hiver). L'outil calcule cinq indicateurs climatiques : 1. La somme des températures automnales ; 2. Le gel hivernal ; 3. Le quotient photothermique au cours de la floraison 4. Le déficit hydrique pendant la floraison ; 5. Le déficit hydrique post-floraison. Chaque indicateur répond à des seuils et peut prendre trois valeurs : non limitant, assez limitant et limitant. Des sorties graphiques permettent de visualiser la cinétique du bilan hydrique et du quotient photothermique. La caractérisation climatique de la campagne 2010 met en évidence des situations contrastées en termes de stress climatique. Le gel hivernal n'ayant été limitant dans aucune situation, il n'a pas été retenu comme indicateur. La somme des températures automnales a été « assez limitante » dans une seule situation (Prouvais). Le quotient photothermique pendant la floraison est généralement non-limitant mais deux situations assez limitantes et deux situations limitantes ont été observées. Un stress hydrique limitant au cours de la floraison a été noté dans la moitié des situations alors qu'un stress hydrique post-floraison a été observé dans 8 situations sur les 11 au total (Tableau 4).

	Sorties Azodyn			Sorties Diacol				Dire d'experts
	INN EH	INN SH	INN F1	Som temp aut	Q PT flo	Stress H2O flo	Stress H2O post-flo	
Mordelles	1.31	1	0.82	957.8	1.67	2.24	1.36	Non stressée
Crisenoy	0.65	0.6	0.95	951.9	1.57	1.01	0.45	Non stressée
Houville la Branche	0.47	0.42	0.41	938.6	1.6	0.37	0.55	Très stressée
Toury	0.65	0.53	0.82	987.1	1.51	0.66	0.57	Moyennement stressée
Pommevic	0.51	0.39	0.68	812.3	1.43	1.73	1.17	Stressée, sol pauvre
Breteniere	0.41	0.36	0.62	870.2	1.41	2.19	1.65	Non stressée
Houplines	0.53	0.6	0.4	765.6	1.72	0.46	0.43	Moyennement stressée
Prouvais	0.58	0.47	0.81	548.1	1.59	1.16	0.47	Non stressée
Martincourt	0.48	0.38	0.65	1081.8	1.31	0.41	0.76	Moyennement stressée
Selommes	0.88	0.7	0.93	966.3	1.61	0.86	0.49	Non stressée
St Martin de Fraigneau	0.4	0.6	0.6	1150.9	1.49	0.77	0.34	Moyennement stressée

Tableau 4 : Présentation des indicateurs environnementaux issus d'Azodyn, Diacol et des dires d'experts

La confrontation de la caractérisation climatique de DIACOL, des états azotés et du dire d'experts montre qu'il y a une bonne concordance entre les approches pour les situations non stressées et moyennement stressées. Les situations les plus stressées selon DIACOL correspondent à des situations

qu'AZODYN avait classé moyennement à très stressées en azote mais qui n'avaient pas été identifiées comme telles par les experts (Martincourt et St Martin de Fraigneau). Les situations considérées comme très stressantes à dire

d'experts correspondent à des situations avec un stress hydrique à floraison qui se poursuit en post-floraison. La méthode DIACOL développée dans le cadre de ce projet se limite à certains stress climatiques et pourrait être complétée par d'autres stress climatiques. Par exemple, le stress hydrique entre la reprise de végétation et le début de floraison pourrait être aisément rajouté. Cet indicateur contribuerait à une meilleure compréhension de la valorisation, ou non, des apports azotés de printemps.

Conclusion sur la caractérisation des lieux avec les outils AZODYN et DIACOL

L'utilisation conjointe des deux outils a permis de caractériser les situations en termes de statut azoté (INN) à l'aide d'AZODYN et de stress climatiques à l'aide de DIACOL. Les sorties des deux outils concordent assez bien entre elles et avec les dires d'experts démontrant ainsi que le stress azoté est dû à des stress hydriques et non à une conduite très limitante en azote de la part de l'expérimentateur. L'estimation de la réserve utile (RU), variable d'entrée pour les deux outils utilisés, est une difficulté récurrente déjà identifiée à chaque fois qu'elle intervient comme variable d'entrée pour une étude. Les stress hydriques devront être mesurés à l'avenir en s'appuyant sur un calcul de réserve utile qui soit robuste et reconnu de tous. Plusieurs programmes de recherche en cours amèneront dans un futur proche des solutions en ce sens.

Comparaison et positionnement des itinéraires techniques suivis dans le réseau CTPS par rapport à la réalité des pratiques agricoles

La première partie faisait l'analyse comparative des conduites culturales technique par technique. Ici, les pratiques culturales appliquées dans le réseau CTPS et chez les agriculteurs sont comparées dans leur ensemble sur la totalité du profil.

Le CETIOM réalise tous les deux ans une enquête postale sur les pratiques culturales des agriculteurs dans les principales zones de production du colza d'hiver. Les données de l'année 2010 ont servi de base de comparaison. Des analyses multivariées ont été conduites pour analyser la diversité des pratiques agricoles et ses déterminants, (Schmidt, 2009).

La typologie 'agriculteur' a permis d'identifier 7 classes de conduite (Tableau 5) appliquées respectivement sur 4 à 24 % des surfaces de colza.

Au sein du réseau CTPS, deux types de conduites ne sont pas représentées : Conduite « Sud » et travail simplifié représentant environ 23% de la sole française. Cela s'explique, d'une part, par le positionnement du réseau très axé sur la diagonale Charente-Lorraine et, d'autre part, par le fait que pour des raisons d'expérimentation, les responsables d'essais ne se mettent volontairement pas dans des conditions de travail du sol simplifié. La conduite « éleveur » se retrouve un peu sous-représentée par rapport aux pratiques actuelles (8% contre 14%). La conduite « céréalière » est majoritaire dans les deux cas, même si, dans le réseau elle est surreprésentée. Les conduites « classique » et « haut-potentiel » se retrouvent respectivement 2^{èmes} et 3^{ème} et couvrent à elles deux 45% des conduites présentes dans le

réseau et 34% de celles rencontrées dans les pratiques agricoles actuelles.

Même si on ne retrouve pas exactement à l'identique les conduites et proportions, l'adéquation entre le réseau d'essais CTPS et les pratiques agricoles actuelles est relativement bonne. Des ajustements à l'avenir pourront être réalisés en diminuant un peu les cas de conduite type « céréalière » tout en augmentant légèrement le nombre de plateformes en conduite « éleveur » et en travail du sol simplifié.

En tout état de cause, on peut conclure, que les ITK dans le réseau ne sont pas uniformes et reflètent au mieux et sous contrainte d'expérimentation variétale, la diversité des pratiques françaises. Le réseau d'essais est donc tout à fait robuste en termes de zones couvertes et d'itinéraires appliqués pour une homologation variétale nationale. Le souci de coller à la réalité, d'avoir de la diversité au sein du réseau et de tester de nouveaux itinéraires techniques de type intégrés, réduisant l'utilisation des herbicides et des fongicides (Valantin-Morison, 2007 ; Dejoux, 1999) doit rester cependant une préoccupation importante dans la gestion du réseau.

N°	Nom	Caractéristiques principales	Quantification (proportion des surfaces)	Proportion ITK CTPS (13 plateformes)
1	Conduite « éleveur »	Apport de matières organiques Pailles du précédent ramassées Dose d'azote minérale faible	14 %	8 %
2	Conduite « classique »	Labour Pas de matières organiques Désherbage du précédent sol	19 %	23 %
3	Conduite « Sud »	Travail simplifié majoritaire Pas de matières organiques Semence monograin, variété CHL	4 %	0 %
4	Conduite « céréalière »	Désherbage complet Pas de matières organiques Dose d'azote minérale élevée Nombre d'insecticides élevé	24 %	46 %
5	Conduite « haut-potentiel »	Labour & Variété hybride Dose d'azote minérale élevée Ab-fong., insecticides et régul. importants	15 %	23 %
7	Conduite « travail simplifié »	Travail simplifié majoritaire & lignée Désherbage important : interculture et prog. complet Nombre d'insecticides élevé	19 %	0 %

Tableau 5 : Typologie de conduite culturale 'agriculteur' en colza d'hiver (d'après les enquêtes CETIOM 2010) et répartition des plates-formes CTPS 2010 dans ces classes

Identification de nouveaux indicateurs du comportement des variétés

Analyse et réflexion sur la prise en compte des Interactions Génotype x Environnement x Conduite dans le jugement des variétés

• Description des IGEC

La recherche d'indicateurs de comportement variétal s'est essentiellement axée sur l'analyse des Interactions Génotype x Environnement x Conduite (IGEC) et les données de sorties potentiellement utilisables.

Depuis le milieu des années 1990, la commission choix d'essais Colza utilise comme outil d'aide à la décision la méthode AMMI (Additive Main effects and Multiplicative Interaction) pour décrire les IGEC. Cet outil amélioré au fil des ans se base sur des Analyses en Composantes Principales et sur des Classifications Ascendantes Hiérarchiques, complétées par des boîtes à moustaches descriptives des interactions au niveau Génotype et au niveau Environnement et un

calcul d'écovalence (somme des termes d'interactions élevés au carré).

La méthode AMMI a fait ses preuves pour bien décrire les différents comportements variétaux, sans pour cela les expliquer. L'écovalence apparaît comme un indicateur relatif synthétique et robuste pour quantifier le niveau d'interactivité des variétés et des lieux. Les variétés très sensibles à l'environnement ont une forte écovalence, alors

que les variétés plus stables ou ayant un comportement, à chaque condition pédoclimatique rencontrée, très proche du comportement moyen de toutes les variétés, ont une écovalence faible.

Au final, les écovalences pourraient être une bonne variable candidate permettant de décrire les variétés et leur niveau d'interactivité. Il reste à tester et confirmer cette hypothèse sur d'autres jeux de données.

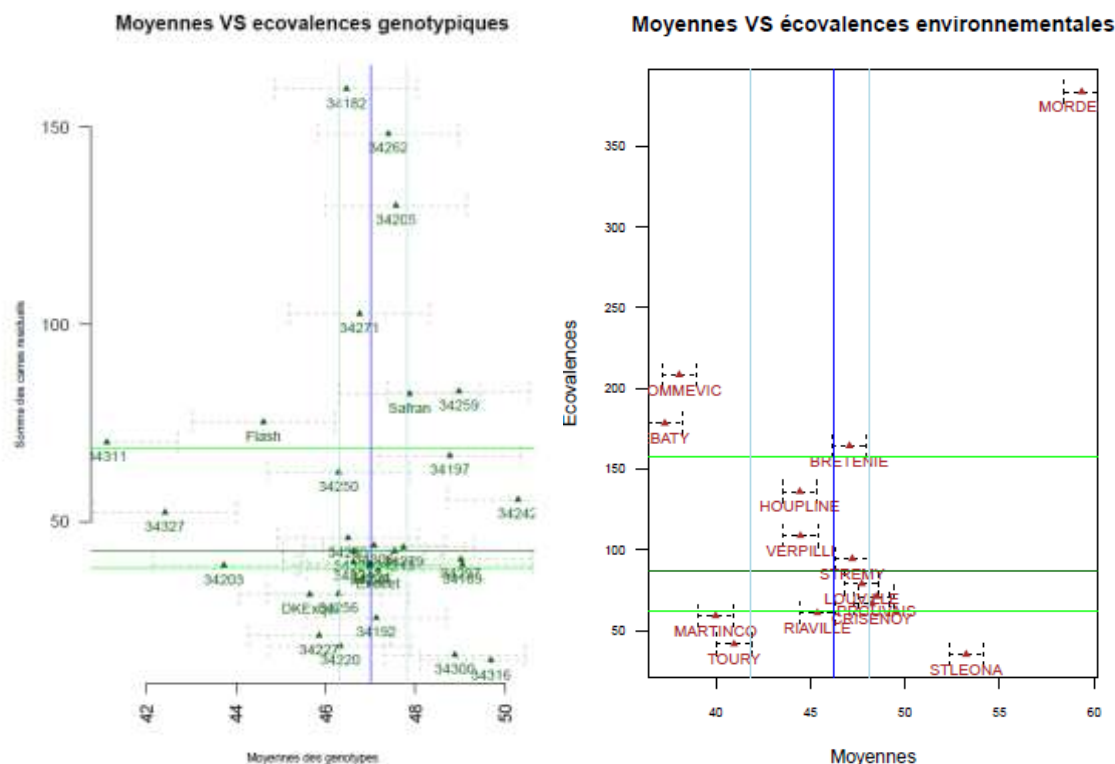


Figure 2 : Productivité en rendement graines : niveau et stabilité des variétés et des environnements (écovalence)

• Explication des IGEC

Plusieurs méthodes sont testées actuellement pour expliquer les IGEC. On peut citer la régression factorielle qui cherche à décomposer l'effet de l'environnement par des covariables le plus souvent environnementales et considérées comme des facteurs explicatifs des variations de rendement. Cette méthode très utilisée dans les 20 dernières années a ses limites, notamment la non-prise en compte des corrélations entre variables. La régression PLS utilisée ici est une méthode plus puissante qui supprime cet inconvénient (Tenenhaus, 1998).

Toutes les covariables disponibles ont été testées comme prédictrices du rendement variétal :

Typologie d'ITK (4 classes de 1 à 4) : CTYP; INN Entrée Hiver : IEH; INN Sortie Hiver : ISH; INN début floraison : IF1; Somme des températures automnales : STA; Quotient photothermique à floraison : QPTF; Stress hydrique à floraison : SHF; Stress hydrique post floraison : SHPF; Situation azotée à dire d'experts (3 classes) : EXP.

Les lieux sont projetés dans l'espace multidimensionnel construit en tant que variables illustratrices. Ils ne participent pas à la construction des axes. Le logiciel statistique utilisé a été Tanagra, disponible sur Internet. Les développeurs de Tanagra ont implémenté la régression PLS en se basant essentiellement sur les travaux de Tenenhaus (1998).

Avec les 2 axes retenus, 73% de la variabilité du rendement (66% par le seul Axe 1) est expliquée par 61% de variation de ces descripteurs. Comparativement, en Analyse en Composantes Principales, dans la majorité des cas, il fallait au minimum 5 axes pour décrire 75% des IGEC.

Six variables explicatives se révèlent significatives dans l'explication du rendement variétal. Les dires d'experts et les INN entrée et sortie hiver (très corrélés entre eux) sont les plus importantes, suivies du type d'ITK puis du quotient photothermique à floraison et de l'INN F1. On retrouve dans cette analyse la corrélation dires d'experts, INN sortie hiver influencé lui-même par un stress hydrique printanier. Cela démontre à nouveau que le jugement des experts, cette année là, a été tout à fait juste et facilité par des stress facilement identifiables et dépendants (le stress hydrique amenant un stress azoté).

Les stress hydriques à floraison et après ainsi que la somme de température automnale n'ont pas ou peu d'influence dans cette analyse (figure 3).

Sur le premier axe (40% de l'information des descripteurs), les variables INN entrée hiver, sortie hiver, et dans une moindre mesure, les dires d'experts expliquent les 2/3 des variations du rendement variétal en moyenne. Trois variétés voient leurs variations de rendement expliquées à plus de 80%. Sur le deuxième axe (21% de l'information des descripteurs), les variables climatiques à floraison et après sont

prédominantes mais n'expliquent que peu de variance du rendement (6%) hormis pour trois variétés (+ de 10%) (résultats non présentés). La qualité de prédiction des valeurs de rendement est très bonne avec une corrélation de 0.93 par rapport aux valeurs observées (figure 5).

La représentation des lieux dans les plans factoriels permet d'analyser les proximités voire de délimiter des regroupements (figure4). Ici on observe le rôle prépondérant des lieux INR35 et Des28 sur l'axe 1 où les covariables INN et direx d'experts jouent les rôles les plus importants. Le lieu INR35 ne se révèle pas limitant en azote alors que le lieu Des28 l'est tout au long du cycle. On peut conclure que pour l'année analysée (2010), le stress azoté induit par le stress hydrique printanier (direx d'experts) est le facteur limitant le plus important et que la réponse des variétés n'y est pas uniforme. Au final, peu de lieux se ressemblent et le regroupement de plusieurs lieux pour qualifier la réponse variétale au stress azoté se révèle délicat avec cette méthode et ce jeu de données.

La régression PLS a permis d'identifier les facteurs limitants pour l'année testée et surtout de mesurer leurs impacts sur les lieux et les variétés avec une très bonne précision. Les données obtenues affinent la connaissance des interactions variétés en conditions démontrées de stress et permettront d'alimenter le continuum inscription-post inscription afin de mieux caractériser les variétés. Toutefois, le nombre d'essais par année et par situation de stress démontrée devra être plus grand, ce qui implique de caractériser toutes les plateformes de manière très fine. Cette méthode n'ayant été testée que sur une année, elle reste à valider sur un nombre de données plus important et sur plusieurs années.

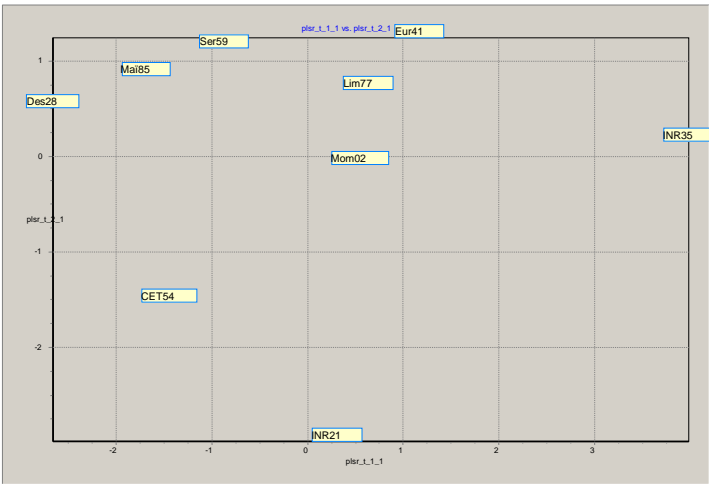


Figure 4 : Graphique des composantes PLS : Scores X (t1,t2)

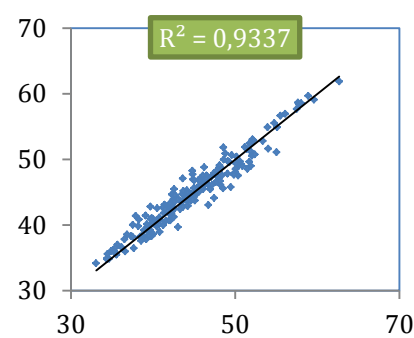


Figure 5 : Valeurs observées y et prédites ŷ

Conclusions et perspectives

Ce projet a permis, malgré des réorientations dues à la disponibilité des données, de caractériser, avec l'état de l'art actuel, le réseau d'essais officiel pour les études VATE de colza. Il a ainsi permis de faire un recensement de l'existant et, ce faisant, de donner des pistes de réflexion, pour le futur, pour la mise en place du volet de « valeur environnementale » des variétés.

La principale originalité de ce programme aura été de coupler un modèle simple, un outil de diagnostic allégé et des direx d'experts afin de démontrer que la diversité existe dans le réseau d'essais, tant au niveau des ITKs suivis, que dans le comportement des variétés face à des stress abiotiques identifiés.

Ce programme aura aussi permis de s'assurer que le pilotage du réseau par les experts était efficace, tant en terme de positionnement géographique, que de protocole. La conduite des essais s'avère tout à fait raisonnée et en lien avec les pratiques agricoles actuelles. Les experts bénéficieront de ces données pour faire d'éventuelles propositions d'évolutions afin de couvrir encore mieux la gamme complète des pratiques.

Certains thèmes abordés au cours de cette étude mériteraient de faire l'objet d'un travail plus approfondi. Ainsi, en ne travaillant pas sur des données historiques mais sur des données demandées *a priori*, il sera plus facile de mieux caractériser tous les lieux d'essais du réseau, même s'il ne paraît pas envisageable d'augmenter énormément les informations demandées auprès des expérimentateurs partenaires.

Par ailleurs, les covariables descriptives des stress devront faire l'objet d'un travail spécifique. Ces covariables doivent

VIP (Variable Importance in Projection)		
Variable	Axe 1	Axe 2
CTYP	0.98	0.97
IEH	1.33	1.28
ISH	1.41	0.83
IF1	0.83	0.83
STA	0.07	0.17
QPTF	0.96	1.01
SHF	0.68	0.76
SHPF	0.24	0.50
EXP	1.46	1.41
Rôle de chaque descripteur dans l'explication des axes		
Variable	Axe 1	Axe 2
CTYP	-0.33	0.27
IEH	0.44	-0.13
ISH	0.47	0.20
IF1	0.28	-0.29
STA	-0.02	0.18
QPTF	0.32	0.46
SHF	0.23	-0.46
SHPF	0.08	-0.51
EXP	-0.49	-0.27

Figure 3 : Importance et rôle des descripteurs dans le rendement variétal

être mesurées ou estimées avec le plus grand soin et de manière harmonisée entre partenaires, pour qu'elles puissent être utiles au continuum préinscription, inscription et post-inscription.

Azodyn devra être revu pour estimer au mieux les indices de nutrition azotée avec les variétés actuelles et ce dans toutes les conditions agrométéorologiques de la sole française de colza. Cet outil à terme, devra servir à piloter et analyser la réduction de dose d'azote apportée sur les essais, axe majeur retenu dans le plan d'action de la mise en place du volet valeur environnementale dans les études VATE.

Les stress hydriques devront être mesurés en s'appuyant sur un calcul de réserve utile qui soit robuste et reconnu de tous. Plusieurs programmes de recherche en cours amèneront dans un futur proche des solutions en ce sens.

Dans une volonté de caractériser le comportement des variétés en conditions de stress, la caractérisation des facteurs limitants biotiques du réseau a été identifiée comme première priorité par la section CTPS Colza en 2012. Plusieurs pistes sont possibles pour cette caractérisation : les Bulletins de Santé du Végétal, le suivi parcellaire du CETIOM (kit pétales, insectes...), le modèle SIPPOM (Simulator for Integrated Pathogen Population Management), l'ajout d'un témoin de sensibilité au phoma dans le réseau CTPS classique (exemple : Eurol), le modèle Sclerotinia développé par Syngenta, le modèle insectes Proplant développé par le CETIOM, le suivi des cuvettes réalisé par les expérimentateurs. Des programmes de recherches actuels devraient permettre de mieux caractériser la résistance au sclerotinia. Ainsi par la voie de tests spécifiques (comme pour le phoma) et la mise en place d'un système de bonification, le CTPS pourra orienter l'inscription vers des variétés plus économes en fongicides. Lorsque les critères de compétitivité vis-à-vis des adventices seront mieux définis, ils pourront être pris en compte dans le protocole d'étude VATE. Les indicateurs de comportement variétal face à des stress existent, mais cette étude n'aura pas permis avec les données disponibles de s'assurer de leur robustesse au fil des ans.

Un travail devra être mené lorsque l'état de l'art le permettra pour choisir lesquels seront les plus pertinents et de quelle manière il faudra les utiliser pour orienter le progrès génétique vers des idéotypes plus adaptés à une agriculture durable.

Bibliographie

Agreste, 2008. Enquête sur les pratiques culturales en 2006. Chiffres et Données - Série Agriculture n° 200 août 2008

Agreste Poitou-Charentes, 2008. Enquête Pratiques Culturales 2006 Utilisation des produits phytosanitaires - Colza. Agreste 13, septembre 2008

Chambre d'Agriculture des Vosges, 2009. Calculez votre indice de fréquence de traitement. Ferti-ouest 88. N° 66

Champeaux C., 2006. Recours à l'utilisation de pesticides en grandes cultures. Évolution de l'indicateur de fréquence de traitement au travers des enquêtes Pratiques culturales du SCEES entre 1994 et 2001. Champeaux C., 2006. Ministère de l'Agriculture et de la pêche, Institut national de la recherche agronomique, UMR 211 Agronomie Grignon, septembre 2006, 101 p

Colnenne C., 1999. Les besoins en azote du colza d'hiver, courbe critique et effets de carences temporaires sur l'élaboration du rendement. Thèse de Doctorat, INAPG, Paris, 1999

Dejoux J.F., 1999. Evaluation agronomique environnementale et économique d'itinéraires techniques du colza d'hiver en semis précoces. Rapport de thèse http://www.inra.fr/ea/EA_these

GEVES, 2010. Protocole d'expérimentation Colza Oléagineux d'Hiver Essais de Valeur Agronomique et Technologique, 7 Août 2010 <http://cat.geves.info>

GEVES, 2012. Règlement technique d'examen des variétés de colza oléagineux en vue de leur inscription au Catalogue Officiel Français (liste A et liste B), 27 Septembre 2012 <http://cat.geves.info>

Schmidt A., 2009. Caractérisation des pratiques de protection des cultures et réflexions sur les conditions de réussite d'un plan de réduction de l'utilisation de produits phytosanitaires par les pouvoirs publics. Application à la production de blé et de colza. Mémoire de fin d'études AgroParisTech, INRA, 93 p. Agreste synthèses, synthèse n°2012/121 7p

Tenenhaus M., 1998. La régression PLS théorie et pratique, Ed. TECHNIP, janvier 1998, 254 p

Valantin-Morison M., Aubertot J.N., Lemarié S., Lacroix A., Reau R., 2007. Conduite intégrée du colza d'hiver pour une réduction de l'utilisation des pesticides. Rapport MEDD, 64p

Valantin-Morison M., Jeuffroy M.H., Champolivier L., 2004. Evaluation and sensitivity analysis of Azodyn-rape, a simple model for decision support in rapeseed nitrogen. 11th Congress of European Society of Agronomy, Copenhagen (Denmark).

Quelle place de la génétique dans le futur avec la perspective d'augmenter la production et d'apporter une contribution positive à l'environnement ? L'exemple des céréales

Philippe GATE*

*Directeur scientifique ARVALIS - Institut du végétal
Administrateur et membre de l'Association des Sélectionneurs
Français - E-mail :
p.gate@arvalisinstitutduvegetal.fr

Opportunités et exigences d'une agriculture multi-performante

Le contexte de la production agricole a évolué notablement ces dernières années avec le défi de nourrir et l'exigence de mieux gérer la planète, et face à un jeu de contraintes de plus en plus impactant : des contraintes décidées (restriction des solutions phytosanitaires, réduction des volumes d'irrigation avec des calendriers plus incertains), des contraintes subies (changement climatique) et quasiment programmées (volatilité des prix, augmentation du coût de l'énergie).

Face à ce défi, tout le monde est d'accord pour concevoir des systèmes de culture combinant quatre grands objectifs :

- Moins dépendants des intrants de synthèse, de la chimie, à l'hectare mais aussi à l'unité produite ;
- Pérennisant davantage les ressources naturelles, réduisant les impacts environnementaux, voire contribuant positivement aux enjeux écologiques, garantissant la santé des agriculteurs ;
- Plus résilients face aux changements globaux ;
- Tout en assurant un haut niveau de production, une qualité nutritionnelle et sanitaire irréprochables et une bonne efficacité économique.

L'atteinte de ces objectifs repose sur le développement d'une agriculture productive, dont l'augmentation des volumes par hectare au plan national est un impératif dans le système économique actuel, pour contribuer aux besoins alimentaires mondiaux et pour satisfaire des marchés export de proximité et en croissance structurellement forte dans les prochaines années. Cette nécessité d'accroître les productions disponibles pour des marchés en croissance ou demandeurs s'applique de la même façon à certains marchés domestiques : si la consommation de blé

meunier ou de maïs grain en alimentation animale est et sera stable, voire (alimentation animale) en légère érosion, d'autres (production biologique, protéagineux, produits industriels biosourcés...) ont un fort potentiel de développement. Ces objectifs imposent également la recherche d'une excellence environnementale face à une attente forte des citoyens, des clients, et aussi des producteurs eux-mêmes soucieux tant de leur cadre de vie, de la préservation de leur santé, que de la satisfaction des consommateurs de leurs productions.

La stratégie sera de combiner les apports d'une optimisation des systèmes en place (choix variétal, optimisation technique des pratiques, du pilotage des cultures...) efficace à court terme, et la recherche de systèmes de culture innovants ou de rupture, permettant de maintenir ou d'accroître la production, tout en recherchant une moindre dépendance aux intrants et une plus grande capacité de résilience vis-à-vis d'accidents climatiques de plus en plus fréquents.

La réalisation de ces objectifs (dans un cadre réglementairement contraint, de mise en œuvre de pratiques agro-écologiques, de réduction des intrants de synthèse, et de changement climatique), impliquera de mieux combiner l'ensemble des leviers techniques disponibles et utiles, y compris les intrants de synthèse dans une boucle itérative de progrès. Elle exigera en parallèle une évaluation continue des marges de progrès en fonction des avancées des connaissances et des innovations qui seront proposées aux producteurs : évaluer les fonctions éco-systémiques mais aussi la rentabilité économique, et également la faisabilité agronomique, afin d'estimer les risques de succès ou d'échec des solutions proposées.

Par ailleurs, certains objectifs de performance obligent à une investigation au-delà de l'échelle de l'exploitation. Certains effets ne seront bénéfiques et durables que si les pratiques sont modifiées à l'échelle des territoires et collectivement par les producteurs, comme par exemple, l'amélioration de la qualité de l'eau, la gestion quantitative de l'eau, la biodiversité fonctionnelle basée sur les auxiliaires, la gestion durable des résistances variétales...

L'objet de cet article est d'appréhender quelles sont les marges de manœuvre de l'amélioration génétique en prenant plus particulièrement l'exemple des céréales, dans une agriculture multiperformante, en interaction avec les autres moyens techniques à différents niveaux d'organisation (itinéraires techniques à l'échelle de la parcelle, systèmes de culture, et territoire).

Agriculture multi-performante et valorisation de la génétique

Schématiquement, la pleine valorisation de l'amélioration génétique pour une agriculture multi-performante dans un contexte de moindre dépendance aux intrants de synthèse, de meilleure gestion des ressources, et de changement climatique, impliquera de combiner davantage différents moyens d'action :

- Associer stratégie d'esquive et caractères de tolérance, de résistance aux stress biotiques (dûs aux êtres vivants, d'ordre parasitaire) et abiotiques (résultant de facteurs environnementaux, d'ordre climatique et nutritionnel) ;

- Régler les itinéraires techniques pour maximiser l'expression des caractères mais aussi rechercher dans le cadre de systèmes de culture innovants, des traits génétiques spécifiques à exploiter ;

- Face à une variabilité interannuelle de plus en plus présente, travailler davantage sur la stabilité (ou la variabilité) des comportements, proposer également des « bouquets variétaux » capables de prendre en charge en complément les facteurs limitants peu prévisibles et préjudiciables.

Pour être efficace, cette approche doit d'abord identifier et hiérarchiser les moyens d'action prioritaires en regard des facteurs qui sont et qui seront au cours du temps les plus limitants. Face à un facteur limitant identifié, il apparaît également indispensable de déterminer les voies de recherche les plus fructueuses. S'agissant par exemple de l'échaudage thermique des céréales, faut-il privilégier des semis plus précoces, une phénologie adaptée, ou améliorer la tolérance aux fortes températures ? Avec l'ambition de sélectionner des variétés productives sans réduire la teneur en protéines des grains, faut-il améliorer le transfert d'azote des parties végétatives vers les grains ou stimuler l'absorption racinaire post-floraison ?

Les réponses à ces questions, pas toujours abordées, permettent de savoir ce qu'il faut phénotyper (quels caractères observables analyser) en priorité, et aussi comment phénotyper. Mais cela n'est pas encore suffisant : il deviendra de plus en plus nécessaire de mieux connaître la variabilité des expressions en fonction des conditions de milieu et des pratiques. Ensuite, le travail nécessaire d'assemblage pour proposer les combinaisons de réglage les plus efficaces (variétés-pratiques-système de culture) impliquera également la mise au point d'outils de pilotage appropriés pour gérer les aléas interannuels.

Innover dans la phénologie des espèces

Le premier levier repose sur le choix le mieux adapté au milieu des espèces et des variétés en fonction de leurs caractéristiques physiologiques et des contraintes qui s'exercent par milieu. De ce fait, la connaissance des environnements, de leurs variabilités et de leurs conséquences sur les cultures devient, avec la connaissance du fonctionnement des cultures, des disciplines socles pour valoriser la génétique.

Par espèce et par variété, il convient de caler leur phénologie, c'est-à-dire leurs phases et leurs stades de développement de telle manière que la plante évite le plus fréquemment possible les stress présents dans le milieu : c'est la stratégie d'esquive qui repose sur les meilleures adéquations entre précocité, date de semis, densité de semis et pratiques culturales associées en cohérence.

Le changement climatique qui se traduit notamment par une élévation tendancielle des températures interpelle cette notion de stratégie d'esquive. Pour le sélectionneur de céréales à paille semées à l'automne, il s'agit de mieux stabiliser dans le temps l'apparition de certains stades de développement. En effet, en situations de températures automnales et hivernales « anormalement » douces (comme en 1995 et en 2007), le stade début-montaison risque

d'apparaître beaucoup trop tôt en cours de campagne occasionnant des préjudices significatifs : risque de gel d'épis de montaison, risque de verse car élongation en jours courts, faible interception du rayonnement. La recherche de nouveaux profils phénologiques avec des variétés plus stables peut être obtenue en associant aux gènes de précocité intrinsèque, des gènes de sensibilité à la durée du jour. En effet, les céréales sont des espèces de jours longs préférentiels, avec une variabilité de comportement entre les variétés, ce qui signifie que les jours courts peuvent ralentir plus ou moins fortement la vitesse de développement. Pour les variétés plus exigeantes en durée du jour, et à forte précocité intrinsèque, les stades pourront être suffisamment précoces (pour éviter certains stress) tout en conservant une plus grande stabilité de comportement, y compris interannuel, l'élévation des températures en jours courts ayant un impact modéré sur la vitesse de développement. S'agissant du maïs semé au printemps, l'offre supérieure de cumul de températures permet de semer plus tôt des variétés plus tardives tout en acceptant de mêmes niveaux de risques. La sélection de variétés plus tardives peut donc être une stratégie intéressante au moins pour le moyen terme. À l'échelle du producteur, le choix de variétés plus tardives semées plus tôt confère des rendements actuellement plus élevés. La progression des rendements du maïs plus soutenue dans les régions du nord de la France s'explique partiellement par ces changements de pratiques et le fait que le régime thermique sub-optimal pour la photosynthèse se rapproche de plus en plus d'un régime optimal dans ces régions. En effet, dans les régions du nord de la Loire, une plus grande partie du cycle de développement s'opérerait avec des températures inférieures à l'optimum de la photosynthèse (entre 20 et 25°C). Le bénéfice de l'évolution du climat de ces 25 dernières années a donc été davantage marqué pour ces situations.

Le changement climatique s'accompagnant d'une variabilité climatique interannuelle de plus en plus forte, garantit de moins en moins une pleine réussite de ces stratégies d'esquive. Pour minimiser les impacts de cet aléa interannuel, on aura tout intérêt à cultiver dans une même exploitation plusieurs variétés à rythmes de développement différents dont la présence permet une meilleure stabilité des performances : c'est la notion de « bouquet variétal ». En effet, si l'on prend l'exemple des céréales à paille, les conseils qui sont aujourd'hui prodigués visent à ce que l'agriculteur sème d'abord les variétés plus tardives puis les variétés précoces. Le but est que chacune de ses parcelles ait le même calendrier des stades de développement pour limiter ou contourner les obstacles climatiques les plus fréquents. Comme on observe une plus grande variabilité dans le positionnement calendaire des stress (en particulier thermiques et hydriques), cette démarche a toute chance de devenir de moins en moins rentable pour le producteur. Les techniciens du développement doivent donc proposer des méthodes capables à la fois d'intégrer les événements tendanciels (contournables partiellement via l'esquive) et ceux plus aléatoires, moins prédictibles mais néanmoins dommageables. Le fait que l'agriculteur sème en moyenne trois variétés dans son exploitation constitue une opportunité à exploiter. Au-delà des prescripteurs qui devront faire évoluer leurs méthodologies pour mieux conseiller les produc-

teurs, ces nouveaux scénarios devraient également interroger les sélectionneurs : être capable d'offrir par exploitant, pour les différents milieux un tel bouquet variétal. Cet objectif met en avant le besoin de travailler davantage sur des axes nouveaux de complémentarité et de diversité génétiques.

Avec l'opportunité de ressources thermiques supérieures et la nécessité d'être moins dépendant des intrants (en particulier des engrais azotés), les sélectionneurs pourraient également s'orienter vers des matériels ultra-précoces permettant une double culture sur une année. Des travaux plurianuels menés par Arvalis démontrent par exemple que les légumineuses cultivées en culture intermédiaire peuvent offrir jusqu'à 140 kg N.ha⁻¹ pour la culture de printemps suivante comme un maïs. Cette possibilité constitue aussi une source de réflexion pour redynamiser la sélection du blé de printemps, délaissée depuis l'après-guerre, alors que le rendement de l'orge de printemps a été sur un temps court de 20 ans environ fortement amélioré. Les bonnes années, le rendement de l'orge de printemps peut excéder 100 q.ha⁻¹, avec des records observés autour de 120 q.ha⁻¹.

Mieux valoriser les caractères de résistance et de tolérance à l'échelle de la parcelle

Cette première stratégie d'esquive doit bien entendu être combinée avec des traits génétiques associés à des critères de tolérance, d'efficacité ou de sobriété. On rappellera que pour les céréales à paille et pour le maïs, l'amélioration du progrès génétique (augmentation du rendement/ha/an) a été associée à une amélioration de la tolérance aux maladies (céréales et maïs), de l'absorption d'azote et/ou de l'efficacité d'utilisation de l'azote (blé), ainsi que de l'efficacité d'utilisation de l'eau (maïs). De ce fait le levier génétique est central car peut permettre une augmentation conjointe du potentiel de rendement et des critères de tolérance et de résistance.

• Mieux gérer les ressources : azote et eau

La sélection de variétés efficaces et sobres vis-à-vis de l'azote constitue une priorité forte : elle permet effectivement d'intégrer conjointement atténuation et adaptation au changement climatique. En effet, les engrais azotés sont à l'origine de la quasi-totalité des émissions des gaz à effet de serre dans les systèmes de grandes cultures, et on a démontré que le coefficient apparent d'utilisation de l'azote (CAU) est de plus en plus variable, compte tenu d'une disponibilité des pluies plus fluctuante en cours de montaison dans le cas du blé. Par ailleurs, l'azote est un élément qui sera de plus en plus rare et cher et néanmoins indispensable à la production : hormis les légumineuses, les plantes ont besoin - pour la production photosynthétique - d'azote.

L'efficacité dépend en partie de la génétique : dans le cas du blé par exemple, le besoin en azote pour produire un quintal de grains varie aujourd'hui de 2.7 à 3.5 kg N selon les variétés, ce qui correspond à un enjeu de 60 kg N.ha⁻¹ en termes de besoin azoté pour un rendement de 72 q.ha⁻¹ (moyenne nationale du rendement du blé). Les méthodes d'acquisition de telles références sont connues et éprouvées pour un certain nombre d'espèces et pourraient donc enrichir le dispositif de cotation des variétés au moment de leur ins-

cription. On peut ici mentionner qu'un dispositif expérimental nouveau qui vise à caractériser l'efficacité azotée est actuellement en cours de test dans le cadre du CTPS (Comité Technique Permanent de la Sélection, instance émanant du ministère qui coordonne l'inscription des variétés). En complément, il nous faut maintenir pour certaines espèces (le blé tendre et le blé dur notamment), une teneur en protéines satisfaisante pour les marchés avec de telles variétés efficaces, ce qui passe par une sélection visant à augmenter la migration d'azote vers le grain. Pour les céréales à paille, nous connaissons le chemin le plus efficace, d'un point de vue physiologique pour y parvenir : stimuler l'absorption tardive par les racines. Pour le blé, un surplus d'absorption modique après la floraison de 10-12 kg N.ha⁻¹ se traduit par une élévation moyenne de un point de protéines. La voie qui consisterait à stimuler le transfert d'azote des parties végétatives vers les organes récoltés serait sans doute incompatible avec l'obtention de rendements élevés, en anticipant la sénescence des feuilles.

La grande majorité des acheteurs de blé tendre (meunerie française, pays importateurs) exigent par ailleurs des variétés de type Blé Panifiable Supérieur (BPS), caractérisées par la présence de certaines protéines, notamment de gluténines. Il convient donc de vérifier que ces différents critères désirés (plus faible besoin en azote, plus forte absorption racinaire post-floraison et profil protéique type BPS) sont suffisamment indépendants pour être introduits sans trop de contraintes au sein d'une même variété.

Avec une ambition d'augmenter encore plus la production pour le futur, il sera sans doute nécessaire d'innover dans le profil des protéines des grains afin de pouvoir satisfaire les exigences de qualité avec des teneurs en protéines plus faibles. L'atteinte de tels objectifs qualitatifs engagera des recherches collaboratives impliquant davantage l'amont et l'aval. Une valorisation de ces nouveaux profils protéiques en complément aux profils actuels, plus riches en protéines, exigés par les importateurs des pays tiers, imposera une réflexion de l'ensemble des acteurs de la filière vers une plus grande segmentation du marché. Ces profils protéiques nouveaux (moindre exigence en azote des grains) procureront des degrés de liberté, des effets bénéfiques en amont : plus de rendement par hectare via la sélection car augmenter d'un point la teneur en protéines équivaut à diminuer le rendement de l'ordre de 10 q.ha⁻¹. Cette tendance est cohérente avec l'estimation des gains de rendement du blé tendre dus au progrès génétique segmentée par catégorie qualitative (BPS = blé panifiable supérieur, BP = blé panifiable, BAU = blé autres usages) : en moyenne, on trouve un écart de + 0.2 q.ha⁻¹.an⁻¹ entre les blés panifiables et les blés pour d'autres usages, écart qui peut approcher ou excéder la valeur de 0.3 q.ha⁻¹.an⁻¹ dans certaines régions comme la Bretagne ou les Pays de Loire. Par ailleurs, on peut mentionner que les variétés ou les espèces moins riches en protéines - comme le maïs - ou celles dont le procédé de transformation exige de faibles teneurs - comme les orges brassicoles - affichent des besoins en azote par quintal plus faibles (de l'ordre de 2.2 kg N.ha⁻¹ pour produire un quintal de grains). Inversement, les espèces dont les teneurs en protéines sont plus fortes (par ordre croissant, blé tendre BAU puis blé tendre BPS puis blé dur) se caractérisent par des gains de rendement dus à la génétique plus faibles et par une dépen-

dance à l'azote plus sensible (de 2.8 pour un blé type BAU à 3.9 kg d'azote pour le blé dur pour produire un quintal de grains). La demande de variétés de céréales à fortes teneurs en protéines a donc un double impact négatif : sur le progrès génétique et sur l'exigence en azote.

Concernant la dépendance à la ressource en eau, nos connaissances sur la physiologie nous permettent aussi d'adopter la voie la plus gagnante : pour de nombreuses espèces, il s'agit d'augmenter l'efficacité d'utilisation de l'eau par la plante en obtenant pour une même quantité d'eau transpirée une meilleure conversion en rendement. Vouloir adapter les variétés via la régulation stomatique (c'est-à-dire orienter la sélection vers des variétés fermant leurs stomates pour réduire la consommation d'eau) serait un échec car d'une part, les types de sécheresse (fréquence, intensité, période d'apparition...) sont de plus en plus variables inter-annuellement à l'échelle d'une même parcelle, et d'autre part les variétés à forte régulation ne profiteraient pas des années favorables. Une solution idéale serait d'identifier et de sélectionner des variétés avec une régulation stomatique s'adaptant aux scénarios et aux types de sécheresse.

Pour les espèces de printemps comme le maïs notamment, la stratégie d'esquive via des semis très précoces s'avère une piste à privilégier en complément. Si l'on tend vers des semis très précoces, les simulations montrent que la croissance du maïs risque d'être limitée par la présence de températures trop fraîches. Dans le futur, le recours nécessaire à des semis ultra précoces aura comme incidence de caler les premières phases du cycle à des températures sub-optimales pour la croissance et le passage de la transition florale. La sélection de variétés dont la photosynthèse serait moins sensible aux basses températures constitue un axe intéressant, avec d'ores et déjà des recherches en cours.

• **Mieux gérer les stress thermiques**

S'agissant toujours de l'adaptation aux fortes températures, les experts du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) proposent plusieurs pistes : la précocité variétale, la date de semis, la tolérance. Sur la base de cette proposition, les simulations effectuées avec des données météorologiques du passé et du futur s'avèrent très éclairantes : à l'échelle de la France mais aussi pour de nombreux pays, c'est le risque de température excessive au cours du remplissage des grains qui affectera le rendement du blé, plus que les autres paramètres climatiques. Afin de limiter les pertes de rendement consécutives aux excès de températures, on démontre qu'il nous faut en priorité améliorer la tolérance intrinsèque des variétés à la canicule car les stratégies d'esquive fondées sur la phénologie ou le recours à des semis précoces auront des effets bien plus marginaux et aléatoires. Du coup, cette conclusion questionne à nouveau le monde de la recherche : connaît-on les mécanismes physiologiques à l'origine de l'échaudage thermique ? Existe-t-il une variabilité génétique exploitable ? Que et comment phénotyper spécifiquement un tel trait ? Les grands programmes nationaux ou mondiaux n'ont intégré que tardivement cette dimension parmi leurs priorités.

• **Mieux gérer les bioagresseurs**

S'agissant de la dépendance aux produits phytosanitaires, un travail d'inventaire et de hiérarchisation doit être mené pour les différents bioagresseurs (maladies, ravageurs et adventices) : identifier par espèce, les bioagresseurs les plus nuisibles, puis par bioagresseur, les techniques et pratiques mobilisables en les hiérarchisant. Ce type d'expertise a été conduit sur la plupart des grandes cultures. Il conduit à graduer par espèce et par cible de bioagresseur, les efficacités relatives des différents leviers disponibles : génétique, agronomique, techniques alternatives, pilotage de la protection, et optimisation de la pulvérisation. Pour un grand nombre de maladies et pour certains ravageurs, les constats observés et les acquisitions en cours confirment clairement que le levier génétique s'avère souvent le plus efficace et le plus rentable. Il est crucial de rappeler que l'on a démontré que le progrès génétique du blé n'a pas fléchi en France depuis 1982. Il a été plus élevé sur les parcelles non protégées contre les maladies ($1.3 \text{ q.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$) que sur des parcelles traitées ($0.9 \text{ q.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$). Ceci signifie que les variétés récentes sont simultanément plus tolérantes et plus productives. En cohérence, une étude récente démontre également que les notes de résistance aux principales maladies des variétés de céréales inscrites ont évolué très favorablement au cours des vingt dernières années.

Le facteur variétal pourra également être valorisé dans le cadre de techniques nouvelles de protection des cultures. C'est par exemple le cas des mécanismes de défense des plantes (SDP). Les puces génétiques récemment mises au point sont capables de révéler les différentes voies métaboliques qui sont déclenchées lorsque la plante développe un système de défense naturelle. Ces puces d'expression permettent donc à la fois d'identifier de futures molécules candidates et les fonds génétiques les plus aptes à déclencher de tels mécanismes, l'interaction génotype-produits SDP apparaissant effectivement comme très présente. La recherche de molécules olfactives attractives ou au contraire répulsives vis-à-vis de certains bioagresseurs (en particulier contre les ravageurs), et de molécules à propriétés allélopathiques (capacité d'une plante à inhiber la croissance d'autres plantes par sécrétion de substances chimiques) sont aussi des voies qui valoriseront la variabilité génétique des plantes cultivées et des plantes de services (couverts intermédiaires ou permanents).

La notion de « bouquet variétal » décrite plus haut constitue également une démarche à développer davantage dans le cadre de la gestion des bioagresseurs du fait notamment que les maladies sont de moins en moins inféodées à une région particulière : fortes épidémies de rouille brune dans le nord-ouest en 2007, de septoriose dans le sud en 2012, de rouille jaune dans le sud-ouest en 2014...

La réduction des solutions chimiques et l'apparition de résistances aux herbicides (dus en partie au recours à une même famille chimique et au raccourcissement des rotations), réduisent le spectre des solutions efficaces. En l'absence de variétés résistantes aux herbicides, la maîtrise de l'enherbement doit mobiliser en plus de l'usage raisonné des familles chimiques (quand cela est possible) prioritairement les leviers agronomiques : les effets rotationnels en priorité, notamment l'introduction d'espèces de coupure (sans oublier d'explorer l'opportunité récente des cultures

intermédiaires) et certains traits variétaux liées à l'architecture (pouvoir couvrant des variétés). Le recours à des semis à écartements plus larges en blé, pour rendre possible le désherbage mécanique, n'est pas à promouvoir avec les variétés actuelles : les pertes de rendement par hectare sont, d'après les premiers travaux, beaucoup trop importantes en particulier dans les zones à fort potentiel de rendement.

• **Mieux valoriser les relations génotypage-phénotypage**

L'offre technologique en capteurs de proxidtection (télé-détection rapprochée, sur de courtes distances) couplée à des modèles de fonctionnement des cultures ouvre des voies de progrès très intéressantes dont certaines encore insoupçonnées. Par exemple, la capacité à miniaturiser et à coupler les informations issues de différents capteurs sur les plantes (indice foliaire vert, teneur en chlorophylle), sur le sol (teneur en eau spatialisée) couplée à des observations et à des modèles de connaissance permettront assez rapidement d'estimer l'efficacité d'utilisation de l'eau à l'échelle de la micro-parcelle, donc de la lignée ! De même l'accès à de très nombreuses données de cinétiques fines sur la croissance (nombre de mesures par cycle de développement permises par les capteurs, sur un grand nombre de lignées) va sans doute permettre l'émergence de nouveaux formalismes en termes de modélisation du fonctionnement des cultures, mieux adaptés à l'amélioration des plantes.

De ce fait, ces outils et méthodes amélioreront la puissance d'interprétation des relations génotypage-phénotypage. Associés à une connaissance fine des conditions environnementales, des pratiques culturales des réseaux d'évaluation, la connaissance de la variabilité de l'expression d'un caractère en fonction du milieu sera plus accessible.

Nécessité d'intégrer les innovations génétiques dans un cadre d'investigation plus large :

... de la parcelle cultivée...

D'une manière générale, le levier génétique ne sera pleinement valorisé que s'il est intégré dans des systèmes de culture dont le réglage des techniques permet son entière expression, ou mieux, fournit des effets ou des services positifs additionnels. Pour passer du concept à la traduction opérationnelle, il nous faut connaître, intégrer, puis valoriser les interactions positives entre les caractéristiques variétales identifiées et les pratiques culturales ; identifier et valider les meilleures combinaisons qui permettent de réduire la dépendance aux intrants de synthèse ou aux ressources épuisables.

Le point crucial, source de réussite et peut-être d'innovations, est d'identifier en quoi un itinéraire technique nouveau (mobilisant par exemple davantage des pratiques agro-écologiques) modifie le parcours de croissance, de développement et d'élaboration du rendement et de la qualité. Cette investigation nous permettra effectivement de déceler des traits, des aptitudes phénotypiques spécifiques valorisant de nouvelles pratiques. En voici quelques exemples.

En restant à l'échelle de l'itinéraire technique, une meilleure résilience au stress hydrique combinera le caractère d'efficacité génétique avec la stratégie d'esquive qui détermine par milieu les meilleures trajectoires phénologiques. Un examen de la variabilité locale interannuelle des sécheresses imposera une approche définissant, compte tenu de cette variabilité, les meilleures combinaisons variétés-esquive, profitant de l'opportunité que le producteur cultive en moyenne trois variétés.

Pour l'azote, le premier objectif est de rechercher des sources d'azote naturelles (en substitution aux intrants de synthèse) notamment via les légumineuses par la rotation, l'introduction de culture intercalaires, de couverts permanents vivants ou morts, mais aussi par le recours aux produits organiques. Les études menées par les instituts techniques et de recherche ont permis d'en estimer leur composition chimique et leur biodisponibilité au cours du temps pour les cultures. Une deuxième voie consiste à améliorer l'extraction des éléments nécessaires à l'alimentation de la plante. En plus d'une gestion de la fertilité physique et chimique du sol pour garantir la capacité de production, on peut citer les possibilités offertes par l'activité biologique des sols ; notamment, les mycorhizes dont les filaments au contact des racines permettent une meilleure capacité d'absorption et aussi certaines bactéries (par exemple, les actinomycètes) qui ont une action sur la biodisponibilité en éléments majeurs.

On recherchera par les pratiques opérant au niveau du système de culture à augmenter les populations endogènes bénéfiques du sol, sachant que des inoculations de souches sont également des techniques qui peuvent être mises en œuvre. Les connaissances pour passer de l'identification des espèces présentes dans les sols à des notions de fonctions écophysologiques sont nécessaires.

S'agissant plus particulièrement de l'azote, le recours aux espèces associées (par exemple associations blé-légumineuses, colza-lentille...) permettent, à l'échelle de l'exploitation, de diversifier, et par complémentarité fonctionnelle, d'obtenir des volumes par exploitant supérieurs et parfois de meilleure qualité. S'agissant du blé, la performance agronomique du mélange en conduite non fertilisée est supérieure, avec des grains plus riches en protéines, ce qui ouvre des opportunités réelles pour des systèmes bas intrants ou bio.

À l'optimum de fertilisation azotée, ou proche de l'optimum, le volume récolté d'un blé en mélange avec un protéagineux sur 20 hectares est en général supérieur à celui récolté en culture pure sur 10 hectares ; et il est également aussi plus riche en protéines. Cet enrichissement en protéines s'effectue quasi-directement au détriment du rendement par hectare en fonction du niveau de concurrence, en termes de croissance, exercée par la plante associée. En réservant une plus grande surface de l'exploitation au mélange, il est donc possible de produire -via l'association- un plus grand volume de qualité avec sans doute des voies de progrès de réduction d'intrants.

Ces leviers agro-écologiques de la fertilisation sont un complément à ceux mieux connus et qui font, d'année en année, leur preuve en termes d'efficacité : efficacité des apports d'engrais (type d'engrais, moment d'épandage, ensemble des innovations liées à l'amélioration des produits et des

techniques permettant de mieux les épandre, en moindre quantité...), mise en œuvre d'outils de pilotage prenant en compte les aléas annuels, garantissant production et qualité en évitant tout excès, et aptitude génétique (efficacité d'absorption et d'utilisation de l'azote).

S'agissant plus particulièrement des variétés, il conviendra à l'échelle de la parcelle, d'associer au niveau de la variété plusieurs caractères (plus faible besoin, variété à forte fertilité des épis car caractère lié à une moindre exigence en azote pour produire un quintal de grains), plus forte absorption post floraison) avec des techniques culturales synergiques (fractionnement des apports azotés et densité de plantes pour une cinétique d'absorption efficace afin d'éviter une croissance et un excès d'absorption excessifs et trop précoces, nuisibles à l'efficacité). Le recours à des outils de pilotage sera dans ce cadre une garantie pour suivre la trajectoire optimale en termes d'absorption, évitant à la fois les états d'excès et de carence.

À l'échelle du système de culture, un blé cultivé depuis plusieurs années sous un couvert de légumineuses sera confronté à une concurrence vis-à-vis de la plante de service et disposera d'une offre en éléments (notamment en azote) qui pourra être différente en quantité totale (une offre en azote pourquoi pas supérieure si le système est bien piloté) et au cours du temps (concurrence en début de cycle, forte minéralisation en fin de cycle...).

Ces quelques éléments laissent clairement entrevoir des spécificités :

- À la fois génétiques, avec la recherche d'une croissance active en début de cycle, d'une tolérance aux carences précoces, et d'une capacité à bénéficier d'une minéralisation tardive (phénologie, effet *stay-green*, c'est-à-dire un maintien prolongé de la surface verte des feuilles lié à la teneur en chlorophylle et à la teneur en RubisCO, enzyme clé de la photosynthèse et capacité d'absorption post floraison) ;

- Avec une adaptation dans le pilotage de la culture (prise en compte des fournitures en éléments de la plante de service, pour une adaptation des dates des apports).

En complément, on entrevoit que dans de tels systèmes, la quantité d'azote totale disponible pour la plante, en dépit d'une réduction de la dose d'engrais, pourra être supérieure à celle provenant d'un système « classique » conduit à l'optimum de fertilisation azotée pour le rendement. Cette possibilité ouvre aussi une voie nouvelle de rechercher des variétés capables d'absorber plus d'azote pour augmenter le couple rendement-teneur en protéines.

En revanche, pour un blé de printemps précédé d'une culture de légumineuse intercalaire, il est possible que la mise à disposition d'azote soit en tendance trop précoce et plus variable. Il faudra sans doute rechercher pour ce type de pratiques des variétés moins capables d'absorber l'azote pendant le tallage herbacé, via par exemple une architecture différente. En plus d'économiser de l'azote engrais, cette succession permettra également de réduire la pression et les dégâts de certaines maladies. S'agissant de la septoriose, l'inoculum primaire risque fort d'être plus faible (comparativement à un semis précoce d'automne) et sur-

tout la plante pourra davantage échapper au développement de la maladie vers les étages foliaires supérieurs via un rythme d'émergence des feuilles plus rapide.

Globalement, pour les maladies du feuillage il faudra marier au sein de la variété, génétique de résistance, architecture adaptée (freinage du développement de certaines épidémies), et également d'autres traits identifiés plus haut concourant à la tolérance et à l'efficacité (effet « *stay green* », indice de récolte plus élevé). Ces traits seront valorisés par un réglage adapté des pratiques : densité de semis (exerçant un rôle sur le « phytoclimat », l'architecture), date de semis (modifiant la vitesse de sortie des feuilles permettant un meilleur échappement) et statut azoté des feuilles à des stades clés (les excès d'azote même temporaires stimulent la production des spores de certains champignons comme les rouilles).

Ces références acquises vis-à-vis de l'azote et des maladies sont source de questionnements à la fois pour l'agronome et le sélectionneur : par exemple, s'agissant des céréales, l'architecture et l'indice foliaire sont-ils adaptés à des conduites « agro-écologiques » ? S'agissant des maladies, aurait-on tout intérêt à diminuer l'indice foliaire vert (total de la surface déployée par les parties vertes des feuilles par m² de sol), souvent supra-optimal, proches de 5-6 pour le stabiliser à 3 ou 4 jusqu'à la fin du remplissage ? Pour l'efficacité azotée, il serait nécessaire d'éviter le tallage herbacé excessif jusqu'à la fin du tallage et d'obtenir un taux de montée, une croissance plus soutenue par la suite.

De telles hypothèses, valorisant ces techniques, pourraient être testées en utilisant des lignées isogéniques dans différentes modalités de cultures.

... au territoire

Ces réglages doivent à moyen terme franchir l'échelle de la parcelle et de l'exploitation vers une dimension plus territoriale : des objectifs majeurs comme la gestion de l'eau, la durabilité des résistances, la biodiversité fonctionnelle et une meilleure résilience face aux aléas climatiques nécessiteront effectivement un paramétrage et un schéma d'organisation à ce niveau d'échelle spatiale.

Pour la gestion quantitative de l'eau à l'échelle territoriale, les étapes à satisfaire sont par ordre de priorité le choix du panier d'espèces, le recours à des variétés efficaces puis la stratégie d'esquive et le pilotage des cultures dont l'irrigation. Concernant la gestion qualitative, les objectifs prioritaires sont de localiser, de caractériser les parcelles à risques afin de proposer des solutions adaptées, efficaces et rentables économiquement (changements de pratiques, aménagements des bordures de parcelles).

En relation avec la gestion de la durabilité des résistances, les informations génétiques disponibles pour certaines maladies vont permettre de prochainement tester la pertinence d'organiser différemment le paysage variétal en fonction des pathotypes. La disposition actuelle des variétés, leur taux de renouvellement permettent-ils une mosaïque suffisante pour garantir la durabilité des gènes de résistance ? Des démarches sont à l'étude sur la rouille brune du blé, le phoma du colza... mais leurs évaluations en cours restent délicates (gestion à l'échelle du territoire, évaluation sur plusieurs années...), de même que la faisabilité des règles de décision collectives.

Concernant la gestion de la biodiversité fonctionnelle, l'échelle supra parcellaire apparaît comme un niveau privilégié à mieux exploiter : au-delà des aménagements intra et extra parcellaires, les concepts de nurserie (zone dédiée à la production d'auxiliaires, de prédateurs) et de corridor écologique doivent interpeller la notion de complémentarité spatiale entre les différents éléments fixe du paysage et également entre les différents systèmes de production (systèmes grande culture, polyculture élevage, agriculture bio...). Plus simplement, les lâchers d'auxiliaires n'auront une action efficace et durable que s'ils sont déployés sur des surfaces à la fois suffisamment proches et étendues. La biodiversité fonctionnelle devrait également valoriser et explorer davantage la variabilité génétique inter et intra-espèces. Par exemple, s'agissant de l'activité des diptères, une concordance des cycles par une phénologie mieux adaptée des couverts au niveau des dates de floraison mais aussi par le choix de variétés ayant une plus grande et longue accessibilité au nectar (variétés à nectaires extra-floraux). Rechercher au contraire des décalages de floraison entre le blé (avec par ailleurs des variétés qui fleurissent sur un pas de temps court) et les graminées de la parcelle ou en bordure pour limiter la dissémination de l'ergot. Egalement rechercher et installer en bordure des espèces incapables de développer le champignon. De manière générale, pour les concepts de nurserie ou de plantes piège, proposer des couples plante-auxiliaire adaptés afin d'améliorer les facteurs d'attractivité, de prolifération ou de répulsivité.

La notion de bouquets variétaux décrite plus haut constitue également une voie de progrès pour mieux stabiliser le volume et la qualité à l'échelle territoriale pour un organisme de collecte. Quelles répartitions spatiales des bouquets variétaux compte tenu de la connaissance des milieux (occurrence des facteurs limitants en termes d'intensité, de variabilité spatiale et interannuelle) ? Quels itinéraires techniques, systèmes de culture associés proposer à ce niveau d'échelle ?

Pour synthétiser

Dans la perspective d'augmenter la production et d'apporter une contribution positive à l'environnement, le levier génétique occupe et occupera une place centrale et décisive car il permet d'actionner conjointement les composantes nécessaires à cet objectif : potentiel de rendement et de qualité, tolérance, efficacité et sobriété.

La stratégie gagnante pour le développement d'une agriculture multiperformante, avec la perspective d'augmenter la production et d'apporter une contribution positive à l'environnement, passe par un certain nombre d'étapes à remplir :

- Identifier le plus rapidement possible les facteurs les plus limitants pour prioriser les actions de recherche ;
- Choisir les voies les plus efficaces compte tenu de nos connaissances pour définir les axes de recherche les plus gagnants ;
- Éprouver sur le terrain, les hypothèses de réglages des techniques avec des dispositifs adaptés, par exemple avec des essais analytiques à plusieurs facteurs dans les

systèmes, à des fins d'acquisition de nouvelles références (optimisation du réglage des combinaisons des pratiques culturales), de démonstration et de quantification (moindre dépendance des systèmes aux intrants de synthèse, via par exemple des courbes de réponse aux intrants...) ;

- Et réduire le fossé entre ce que nous savons et les décisions ou les actions qui sont prises, par exemple à court terme en améliorant les règles d'inscription des variétés et les dispositifs expérimentaux d'évaluation (évaluer dans des systèmes nouveaux, plus diversifiés, dont « agro-écologiques », compatibles avec le « produire plus et mieux »).

Par ailleurs, le recours à plus de diversification d'espèces et à des plantes de service, doit également interroger la recherche, à un moment où l'amélioration génétique se concentre sur les espèces d'intérêt économique majeur.

Cet objectif requiert indubitablement une approche transdisciplinaire (écophysiologie, génétique, pathologie et agronomie) avec une capacité à agencer et à intégrer les briques de connaissance dans le but de maximiser les effets de synergie et de durabilité, en investiguant les différents niveaux d'échelle.

Elle exige donc une attitude de complémentarité qui va au-delà des disciplines : par exemple ne pas opposer pyramidage des gènes et bouquets variétaux, ni efficacité génétique azotée avec le recours à des plantes de service (pois, luzerne...). La valorisation de la génétique mobilisera à la fois les innovations technologiques et celles du domaine de l'agronomie et de l'agro-écologie.

D'un point de vue méthodologique, on identifie bien des couches d'informations complémentaires à prendre en compte comparativement aux approches d'interactions génétique-environnement que nous utilisons classiquement. L'environnement doit être complètement explicité avec ses différents composants et déterminants : le milieu (contraintes et atouts pédoclimatiques, occurrence des stress biotiques et abiotiques) et les pratiques culturales que l'on doit envisager au-delà de l'itinéraire technique de la parcelle. La priorité est maintenant d'identifier les interactions positives entre les traits génétiques d'intérêt et l'ensemble de ces composants pour proposer par situation, les meilleures solutions techniques. Cette approche pourrait également déboucher sur la détermination de traits spécifiques nouveaux pour les sélectionneurs, à condition de faire évoluer les dispositifs d'évaluation des variétés dans le cadre des réseaux. La proposition de schémas d'organisation à l'échelle territoriale va également nécessiter la mise au point d'outils capables de mobiliser des couches d'information géographiques spatialisées sur le climat, le sol, les pratiques culturales...

La valorisation de la génétique imposera plus qu'hier de concilier et de combiner les approches analytiques et systémiques et d'organiser la recherche vers plus de partenariats transdisciplinaires et multi-acteurs.

Pour être opérationnelle, cette organisation de la recherche doit embrasser avec les mêmes efforts chacune des étapes clés de la réussite de l'amélioration des plantes : la création variétale, la préconisation et l'utilisation par le producteur.

Explorer la relation Génotype x Environnement

Conception d'idéotypes variétaux en réponse aux nouveaux contextes agricoles et environnementaux

Designing variety ideotypes for new agricultural and environmental concerns

Philippe DEBAEKE^{*1}
Arnaud GAUFFRETEAU²
Charles-Eric DUREL³
Marie-Hélène JEUFFROY²

¹INRA - Inra- UMR Agir - 24, chemin de Borde-Rouge
CS 52627 - 31326 Castanet Tolosan

E-mail : debaeke@toulouse.inra.fr

²INRA - UMR Agronomie - INRA/AgroParisTech - Bâtiment EGER
78850 - Thiverval-Grignon - E-mail : gauffret@grignon.inra.fr
jeuffroy@grignon.inra.fr

E-mail : gauffret@grignon.inra.fr, jeuffroy@grignon.inra.fr
³INRA - UMR IRHS - 42, rue Georges Morel - Boîte Postale 60057
49071 Beaucozéd Cedex
E-mail : charles-eric.durel@angers.inra.fr

Résumé

La création, l'évaluation et le choix variétal doivent répondre à des objectifs de plus en plus diversifiés. Dans un contexte de plus forte incertitude climatique, économique et réglementaire, les idéotypes variétaux actuels mais aussi les méthodes pour les concevoir et les évaluer doivent être revus. L'idéotypage variétal, introduit par les sélectionneurs (Donald, 1968), peut également s'appliquer à la définition de la variété la mieux adaptée à une situation de production donnée. Pour construire des idéotypes, une démarche en trois étapes est proposée: (i) définition d'un ou plusieurs cahiers des charges; (ii) conception et construction des idéotypes répondant à ce(s) cahier(s) des charges; (iii) évaluation des idéotypes construits. La phase de conception peut mobiliser dires d'experts, expérimentations multi-locales, modèles qualitatifs ou quantitatifs. Cette démarche pluri-disciplinaire, ici illustrée sur la culture du pois, aide à organiser la réflexion sur la création et le conseil variétal au sein des filières. Dans ces deux domaines, les outils et méthodes d'idéotypage restent encore largement à construire.

Mots-clés

Idéotype, conception, interaction génotype x environnement, modélisation.

Abstract

Plant breeding, variety assessment and choice have to answer to multiple and diversified goals. In a context of greater climatic, economic and regulatory uncertainty, current variety ideotypes but also methods used to design and evaluate them must be reconsidered. The variety ideotyping concept developed by breeders (Donald, 1968) can be extended to the search of the commercial variety best adapted to a given production situation. To build relevant ideotypes, a three-stage approach is proposed: (i) definition of one or more specifications; (ii) design and assembling of ideotypes responding to the specification(s); (iii) assessment of the ideotypes. The design phase can mobilize expert knowledge, multi-environmental trials, qualitative or quantitative models. Illustrated on pea crop, this multidisciplinary

approach helps organize breeding and variety advice among sectors. In these domains, tools and methods are still to be built.

Key-words

Ideotype, design, genotype by environment interaction, modelling.

Évolution récente de la création variétale

La création, l'évaluation et le choix variétal doivent répondre à des objectifs de plus en plus diversifiés pour faire face aux besoins d'une agriculture à double performance économique et environnementale, de cahiers des charges « bas intrants », et d'une agriculture biologique en croissance, dans un contexte de plus forte incertitude climatique, économique et réglementaire (van Bueren et al., 2002). Cette exigence n'a fait que s'amplifier depuis les années 1990, lorsque les préoccupations environnementales se sont exprimées et plus généralement lorsque les objectifs de contribution de l'agriculture au développement durable se sont affirmés (Meynard et al., 1997; Meynard et Jeuffroy, 2006).

Ainsi, en céréales à paille, la logique de l'intensification culturale initiée dans les années 1970 (avancement des dates de semis, mobilisation accrue de traitements fongicides et systématique de régulateurs de croissance, apports d'azote élevés) privilégiait avant tout des variétés productives. En effet, les risques agronomiques induits par la recherche d'un rendement élevé (permis par les apports d'engrais et les semis précoces) étaient contrôlés par l'application d'intrants phytosanitaires à effets correctifs ou préventifs. Progressivement, d'autres critères de choix variétal ont pris de l'importance (par exemple, la qualité du grain pour répondre aux besoins des marchés). Puis, anticipant une demande de variétés adaptées à des systèmes moins intensifs, la sélection s'est orientée vers des variétés de blé plus rustiques, multi-résistantes aux maladies fongiques et à la verse. Par ailleurs, pour trouver des solutions alternatives à l'usage exclusif des herbicides, au développement d'adventices résistantes et au renchérissement des coûts de désherbage chimique et mécanique, l'aptitude à la compétition des variétés de céréales est devenue un critère d'intérêt pour la sélection et le conseil, en particulier en agriculture biologique (Fontaine et al., 2009).

Si l'adaptation du choix variétal aux conditions pédoclimatiques et aux usages visés (blé biscuitier, blé améliorant, blé fourrager) est depuis longtemps mise en œuvre, ce n'est que plus récemment que, sur la base de travaux initiés à la demande des sélectionneurs, l'intérêt d'un choix conjoint des variétés et des itinéraires techniques a été démontrée de manière structurée et multicritères sur blé tendre (Loyce et al., 2002; 2008), et a été suggérée sur d'autres espèces comme le blé dur (Debaeke et al., 2000) ou le tournesol (Debaeke et Nolot, 2000). Aujourd'hui, la question du raisonnement du couple « variété-conduite de culture » ne fait plus débat dans le milieu scientifique, même si ce n'est pas toujours la question privilégiée par les généticiens. Cependant, adapter le mode d'emploi d'une variété à ses caractéristiques propres, ou à l'inverse, choisir une variété en fonction d'un type de conduite privilégié, restent des pratiques à faire partager par un plus grand nombre (agriculteurs et conseillers).

Différencier le choix variétal selon les environnements et les conduites consiste à valoriser les interactions génotype x

environnement (et génotype x environnement x conduite). Des travaux récents menés dans le cadre du GIS Grandes Cultures à Hautes Performances Economiques et Environnementales par Arvalis-Institut du végétal (blé) et le Cetiom (colza, tournesol) sur les réseaux d'essais de post-inscription montrent que l'effet environnement (E) explique 70-88 % de la variabilité du rendement, alors que les effets génotype (G) et G x E n'expliquent respectivement que 1-7 % et 3-13 % du rendement (Lorgeou et al., non publié). Par contre, dès lors que l'on sort des réseaux d'évaluation caractérisés par de bons potentiels pédoclimatiques et des facteurs limitants maîtrisés, on doit s'attendre à des interactions G x E plus marquées. Pour mieux valoriser les interactions G x E x C, il est important de connaître et prédire la réponse des variétés aux facteurs agronomiques et environnementaux. Cependant, la connaissance de cette réponse reste trop partielle (notamment pour ce qui concerne les stress abiotiques) et non suffisamment objectivée, ni caractérisée, pour que l'on puisse adapter en pratique les choix variétaux aux contraintes hydriques ou nutritionnelles. Lorsque des outils d'aide au choix variétal existent (par exemple, MyVar® développé par le Cetiom), ils se limitent à la prise en compte de la précocité et du comportement variétal face aux maladies.

De son côté, l'inscription officielle des variétés au catalogue par le CTPS a évolué vers une approche multicritères (à côté du rendement, ont été progressivement pris en compte des critères de qualité technologique, précocité, résistance aux maladies et à la verse) donnant lieu à une cotation plus équilibrée et à une plus forte diversification de l'offre variétale. Cependant, une variété qui serait très bien adaptée à un environnement cible particulier, mais moins bien à d'autres, induisant une performance moyenne inférieure à celle des témoins, risquerait de ne pas être retenue par le CTPS car elle pourrait être pénalisée par son instabilité.

L'annonce et la perception d'un changement climatique caractérisé par une augmentation des températures et de la fréquence des événements de sécheresse, s'accompagnant d'une plus forte variabilité inter-annuelle et inter-saisonnière, oblige actuellement les sélectionneurs à réviser leur caractérisation des environnements cibles et les cibles mêmes de la sélection (quels traits ? quelle combinaison de traits ? pour quelle cible : productivité maximale ou stabilité ?) (e.g. Zheng et al., 2012). Aujourd'hui, la recherche d'innovations variétales prend en compte plus explicitement l'adaptation au changement climatique ; c'est un objectif affiché de la collaboration public-privé notamment en blé, maïs, pois, tournesol et pour les productions bio-énergétiques (projets Investissements d'Avenir).

Ainsi, les changements de contexte climatique mais aussi réglementaire (par exemple, réduction des apports d'eau, d'azote et de pesticides) imposent de revoir en profondeur les propriétés des types variétaux disponibles sur le marché, et donc de réviser les idéotypes qui guident implicitement le travail des sélectionneurs. Pour cela, un cadre et des méthodes s'imposent pour concevoir et évaluer les idéotypes et les variétés innovantes issues de la sélection mais aussi pour construire des modes d'emploi pour ces variétés en fonction des cahiers des charges et des zones agroclimatiques.

Le concept d'idéotype

Le concept d'idéotype a été proposé au départ par Donald (1968) comme cadre de réflexion pour renouveler et structurer les approches empiriques de sélection pour le rendement ou d'élimination des défauts majeurs. Appliqué aux espèces d'intérêt agricole, un idéotype est un modèle de plante traduisant l'idée que le sélectionneur se fait de la plante à sélectionner pour un environnement donné et qui ne correspond pas nécessairement à la plante idéale (Zeven, 1975). Donald (1968) définit notamment l'idéotype comme 'un modèle biologique dont on attend qu'il se comporte d'une manière prédictible dans un environnement défini'. Ceci suppose de détailler plus finement le fonctionnement écophysologique de la plante et d'identifier des caractères à sélectionner. C'est pourquoi, dans le cadre d'une école chercheurs sur la conception d'idéotypes⁴ (Debaeke et Quilot-Turion, 2014), nous avons défini l'idéotype comme « la combinaison optimale des caractères morphologiques et physiologiques (traits) ou de leurs déterminants génétiques conférant à un matériel végétal une adéquation satisfaisante à un environnement, à un mode de production et d'utilisation donnés », élargissant encore la nature des traits et des cibles de sélection.

La sélection sur idéotype (« ideotype breeding »), qui s'appuie sur le concept précédent, dispose ainsi d'objectifs plus formalisés, séquentiels et détaillés que la sélection traditionnelle sur objectifs globaux (Rasmusson, 1991 ; Sedgley, 1991). Le principe de la sélection sur idéotype a été initialement développé sur plantes annuelles (Mock et Pearce, 1975 ; Rasmusson, 1987 ; Peng et al., 2008 ; Hanocq et al., 2009), et s'est progressivement étendu aux espèces forestières ou fruitières (Dickmann et al., 1994 ; Socias et al., 1998 ; Lauri et Costes, 2005 ; Cilas et al., 2006), soulignant la généralité de l'approche.

Depuis l'article fondateur de Donald en 1968, le nombre de publications se référant à la notion d'idéotype a régulièrement augmenté (Desclaux et al., 2013), même si un effectif de 15 articles par an, incluant cette notion dans le titre ou les mots-clefs, n'attestent pas d'un emploi massif et explicite du concept. Les articles concernent la définition empirique d'un idéotype pour différents contextes de production (articles anciens), ou la conception/évaluation par modèle d'un assemblage de traits pour des conditions agroclimatiques variables, plus rarement pour des systèmes de culture contrastés (articles plus récents). Le concept est communément cité mais les travaux sur la conception (design) par modèle ou par d'autres voies sont encore rares.

Si la littérature utilise le concept pour se référer à un objectif de sélection, on ne trouve pas beaucoup d'exemples illustrant nettement les progrès permis par une sélection explicitement fondée sur cette notion. Sur riz, Peng et al. (2008) rapportent une augmentation de 8-15 % du rendement avec une sélection fondée sur des caractères morpho-physiologiques par rapport à la sélection classique fondée sur le rendement : ainsi, ce progrès important aurait été permis par un positionnement des trois dernières feuilles vis-à-vis de la panicule optimisant les relations source-puits.

⁴ Ecole-Chercheurs «Conception d'idéotypes de plantes pour une agriculture durable », du 22 au 25 octobre 2012, Seillac (41)¹

Concevoir un idéotype, c'est évaluer *ex ante* la valeur d'un trait donné ou de combinaisons de traits en vue de l'atteinte d'un objectif cible (en général le rendement). Ceci suppose néanmoins de s'assurer qu'il existe du polymorphisme au sein des ressources génétiques pour les traits en question. De même, la recherche des types variétaux les mieux adaptés à une situation de production donnée (sol, climat, itinéraire technique) peut s'appuyer sur la prédiction des effets sur le rendement de différentes combinaisons de traits morpho-physiologiques. De ce fait, proposer un idéotype pour orienter la sélection ou choisir une variété pour un contexte donné relève sensiblement des mêmes approches de conception bien que la base génétique sous-jacente est bien différente dans les deux cas.

En dépit d'une littérature abondante sur la nature des traits à sélectionner, la notion d'idéotype qui est sous-jacente est restée relativement conceptuelle depuis les travaux de Donald et force est de constater qu'il manque un cadre global pour organiser la conception. Par ailleurs, si les travaux de modélisation relatifs à l'évaluation des traits d'intérêt se sont développés dans le monde académique, ils n'ont pas embarqué ni convaincu les acteurs de la sélection. C'est pourquoi, nous proposons ici une démarche structurée, séquentielle, pluri-disciplinaire, multi-acteurs, afin d'objectiver et préciser les étapes de la conception d'un idéotype qu'il s'agisse d'une réflexion *ex ante* pour éclairer la sélection ou de l'identification de variétés adaptées à un nouveau contexte. Dans les deux cas, il s'agira d'évaluer les caractéristiques favorables à combiner et les ressources génétiques mobilisables en impliquant les acteurs concernés.

Une démarche pour concevoir des idéotypes

Une réflexion collective menée dans le cadre du projet Endure⁵, de l'école chercheurs Inra-Cirad¹ et d'un séminaire organisé par le GIS GC-HP2E en partenariat avec le GIS Fruits³ sur les idéotypes variétaux, a permis de formaliser une démarche pour concevoir des idéotypes de plantes. Cette démarche présentée en Figure 1 (page suivante) comporte trois grandes étapes qui consistent à :

- (i) Définir des cahiers des charges pour les idéotypes de plantes (cadre Objectifs) ;
- (ii) Concevoir des idéotypes de plantes susceptibles de répondre à ce(s) cahier(s) des charges (cadre Conception) ;
- (iii) Évaluer la capacité des idéotypes conçus à répondre aux cahiers des charges précédemment définis (cadre Evaluation).

Le processus n'est pas linéaire, les étapes de conception-évaluation donnent lieu à des boucles de progrès, les idéotypes pouvant évoluer selon les résultats de leur évaluation.

Définition des cahiers des charges pour les idéotypes

Définir un cahier des charges consiste à lister et hiérarchiser les objectifs fixés pour les variétés à construire. Ces objectifs

dépendent du contexte de production et d'utilisation des variétés et de leurs produits. La première étape d'une démarche de conception d'idéotypes consiste donc à définir ce contexte particulier et à identifier les acteurs clefs porteurs d'attentes vis à vis des nouvelles variétés et qu'il faudra impliquer dans la démarche.

Ainsi, doivent être précisés le contexte environnemental et agronomique (zone géographique ciblée, conditions de culture biotiques et pédoclimatiques, systèmes de production ciblés...), le contexte économique (débouchés, filières, propriétés technologiques attendues...), le contexte écologique (niveau d'intensification écologique visé...) et le contexte social, politique et réglementaire (réglementation en vigueur, pression sociale, orientation politique particulière à prendre en compte...). Certains de ces éléments peuvent évoluer à des vitesses peu compatibles avec le temps nécessaire à la création de variétés (en particulier dans des filières où la durée entre les premiers croisements et l'inscription est particulièrement longue, comme en vigne et en arboriculture fruitière). Il peut donc être utile de considérer plusieurs scénarios contextuels, en les basant autant que possible sur des études prospectives, raisonner certains éléments du contexte en termes de risques et chercher à identifier les éléments invariants.

⁵ Inventory of major points to consider during the process of elaborating ideotypes in the context of alternative or innovative systems. Deliverable DR4.13 du projet ENDURE (European Network for Durable Exploitation of crop protection strategies)

³ Séminaire « Idéotypes Variétaux », GIS GC-HP2E, 7 et 8 février 2013, Paris

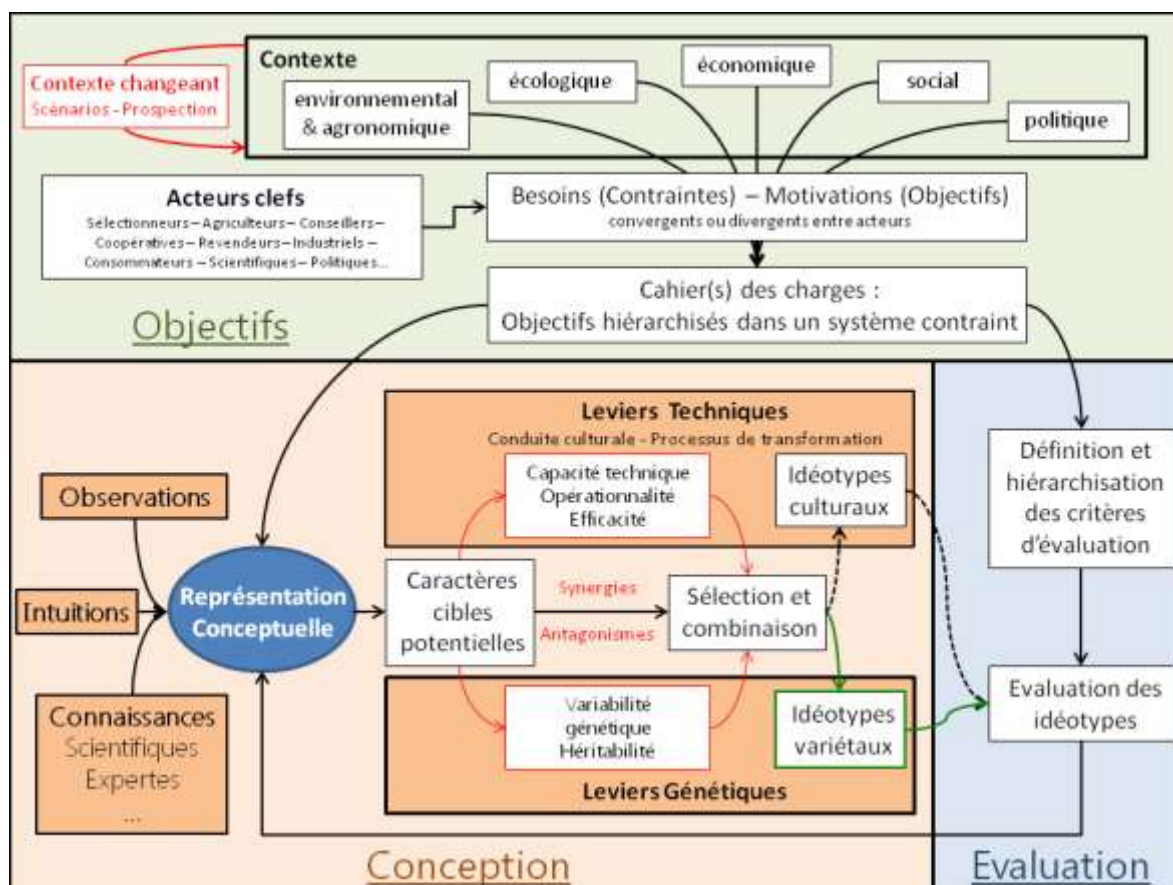


Figure 1 : Schéma de la démarche de conception-évaluation d'idéotypes

Les acteurs à impliquer dans la démarche dépendent du contexte précédemment défini. Parmi eux, nous pouvons trouver des obtenteurs des nouvelles variétés, des utilisateurs (agriculteurs, coopératives, industriels, consommateurs), des préconisateurs (instituts techniques, coopératives, négoces, chambres d'agriculture, industriels...) ou encore des acteurs plus institutionnels orientant fortement la sélection (CTPS, Ministère de l'Agriculture...). Les acteurs impliqués doivent préciser leurs contraintes (techniques, humaines, calendaires...) et leurs motivations (maximiser les revenus, stabiliser la production, améliorer la qualité du produit, limiter les intrants...). Ces contraintes et motivations appliquées au contexte de l'étude donnent lieu à des objectifs fixés pour la plante qui peuvent être convergents ou divergents entre acteurs. Un cahier des charges résulte donc d'une négociation et d'un consensus entre les acteurs. Ce travail doit notamment permettre d'identifier les leviers agronomiques (conduite de la culture, rotation...), technologiques (process de transformation...) ou organisationnels existant tout au long de la filière de production pour pallier les défauts éventuels des variétés et ainsi ne pas faire porter à la seule amélioration variétale toutes les attentes des différents acteurs de la filière.

Le cahier des charges défini dans cette première étape de la démarche ne doit pas être confondu avec la description d'un idéotype. En effet, les objectifs fixés dans un cahier des charges sont généralement des propriétés ou valeurs d'usage pour lesquelles il est attendu une amélioration par rapport au catalogue (rendement, résistance aux maladies

ou à la sécheresse...) alors qu'un idéotype doit se traduire *a minima* par des valeurs de traits morpho-physiologiques susceptibles de permettre aux plantes d'atteindre ces objectifs (par exemple, une capacité à maintenir une transpiration élevée pour des déficits hydriques importants ou une vitesse de couverture du sol rapide) et éventuellement par des caractéristiques moléculaires lorsque le déterminisme génétique des traits est connu. Ainsi, pour chaque cahier des charges établi, plusieurs idéotypes de plante peuvent être proposés.

Conception d'idéotypes de plantes

Cette étape est centrale dans la démarche, elle différencie la sélection sur idéotype de la sélection classique, qui considère généralement comme objectifs de sélection les spécifications du cahier des charges et non les traits morpho-physiologiques. La conception s'organise en deux temps.

- Dans un premier temps, une représentation conceptuelle de la plante que l'on cherche à obtenir est élaborée. Cette représentation s'apparente à un ensemble hiérarchisé de stratégies permettant de répondre aux différents éléments du cahier des charges. Par exemple, pour augmenter le rendement, on pense qu'il peut être utile d'augmenter la densité de peuplement et en conséquence de limiter la compétitivité entre plantes tout en renforçant la résistance à la verse ; pour améliorer la qualité des fruits, on pense qu'il faut agir sur l'architecture de l'arbre en favorisant un éclairage maximal de l'ensemble des branches et une répartition optimale des fruits. Cette étape ne pose pas encore la ques-

tion de la faisabilité des stratégies proposées. Elle invite les concepteurs à mobiliser des connaissances de nature variée plus ou moins formalisées (connaissances scientifiques ou expertes, observations, intuitions issues du vécu des différents acteurs) et facilite ainsi l'innovation notamment en rupture.

- Dans un second temps, l'idéotype correspondant à la représentation conceptuelle est construit. Les caractères de la plante ou du couvert végétal qui permettraient de mettre en œuvre les stratégies établies à l'étape précédente sont identifiés (vitesse de croissance, port de la plante, phénologie, mécanismes de résistance aux stress biotiques

et abiotiques...). Les leviers pour obtenir l'expression de ces caractères sont décrits et évalués. Deux grands types de leviers peuvent être actionnés : (i) des leviers génétiques mis en œuvre par la sélection qui pourront être évalués en termes de variabilité génétique et d'héritabilité associées à chaque caractère cible, mais aussi (ii) des leviers techniques issus de la conduite culturale (application d'un régulateur de croissance pour agir sur la taille des plantes, date de semis pour agir sur le développement de la variété, densité de semis pour agir sur la densité du couvert végétal, taille pour agir sur l'architecture de l'arbre...) qui pourront être évalués selon leur faisabilité, leur opérationnalité et leur efficacité. De ce fait, on parlera d'idéotype cultural ou variétal selon que les caractéristiques recherchées seront permises par la conduite ou par le choix variétal. Ce travail doit permettre

de sélectionner les caractères élémentaires de la plante les moins difficiles à exprimer (par la technique ou la génétique) et les plus efficaces pour atteindre les objectifs fixés dans le cahier des charges. La combinaison des caractères élémentaires donnant lieu à l'idéotype doit faire l'objet d'une analyse préalable des synergies et antagonismes qui existent entre eux (corrélations génétiques et environnementales). Certains caractères peuvent en effet avoir une action positive sur certains éléments du cahier des charges et négatives sur d'autres éléments.

Cette étape de conception doit s'appuyer sur une compréhension et une intégration des mécanismes fins du fonctionnement de la plante. Elle nécessite de mobiliser des connaissances dans différentes disciplines telles que l'écophysiologie, la génétique, l'agronomie et la pathologie qui peuvent être formalisées grâce à des outils de modélisation (mécaniste, statistique, décisionnelle...). Elle favorise le dialogue entre les disciplines et entre les métiers (chercheurs, sélectionneurs, préconisateurs...) et permet d'identifier des verrous de connaissances qui appellent de nouvelles recherches.

La phase de conception peut mobiliser diverses méthodes :
- **La conception à dire d'experts**, s'appuyant sur la connaissance empirique du sélectionneur. Ainsi, Thierry André, responsable de la sélection du tournesol chez Soltis, peut délivrer sa vision de l'idéotype de tournesol à 2030 à partir de sa propre expérience (Tableau 1).

Objectifs	Traits recherchés
Aptitude au semis précoce	Germination et croissances dès 5° C
Tolérance à la sécheresse	Système racinaire hyper-développé et réceptif à la mycorrhization
Compétition vis-à-vis des adventices	Architecture de type « diabolo » (surface foliaire forte en bas et en haut)
Maximiser le fonctionnement de la source après floraison	Architecture de type « diabolo », stay-green et dessèchement accéléré à maturité physiologique
Tolérance aux maladies	Privilégier la résistance quantitative, horizontale
Optimiser la valorisation des akènes	Décorrélérer l'aptitude au décorticage et la teneur en huile
Optimiser la qualité nutritionnelle de l'huile	Viser un profil acide gras de type « Iso4 »

Tableau 1 - La vision de l'idéotype de tournesol pour 2030 : point de vue d'un sélectionneur (Debaeke et al., 2014)

- L'exploitation de résultats d'expérimentations

Qu'il s'agisse d'évaluation des performances variétales (pré ou post-inscription) ou d'expérimentations couplant variétés et conduites de culture en vue de leur ajustement réciproque, l'approche expérimentale en réseau, pluri-annuelle et multi-locale, couplée à une modélisation statistique (ANOVA, AMMI...) permet de mettre en évidence des interactions G x E et G x E x C (Roumet et al., 2014). La mise en exergue de réponses variétales différenciées selon les environnements et les conduites peut ainsi orienter le conseil variétal.

- La conception par modèle

Il peut s'agir de modèles décisionnels qualitatifs (cf partie 4. exemple de la culture de pois) ou de modèles écophysiologiques quantitatifs qui opèrent par simulation de traits individuels ou d'assemblages de traits (Haverkort et Kooman, 1997 ; Asseng et al., 2002 ; Herndl et al., 2007 ; Voisin et al., 2007 ; Qi et al., 2010 ; Casadebaig et Debaeke, 2011 ; Messina et al., 2011 ; Suriharn et al., 2011 ; Semenov et Stratonovitch, 2013 ; Martre et al., 2015) et couplage avec un algorithme d'optimisation (Kadrani et al., 2012 ; Quilot-Turion et al.,

2012). Dans une synthèse récente, Jeuffroy et al. (2014) ont analysé l'apport actuel et les perspectives d'utilisation des modèles agronomiques pour la prévision des performances variétales en vue du conseil.

Évaluation de l'idéotype

Une fois les idéotypes conçus sous la forme de prototypes virtuels, leur capacité à répondre aux objectifs spécifiés dans les cahiers des charges doit être évaluée. Par évaluation, on entend tout d'abord évaluation *in silico* lors de la phase de conception (boucles successives) afin de vérifier que le génotype candidat mérite d'être retenu dans le processus de sélection parce qu'il satisfait aux critères visés. Ceci est assez proche de la démarche proposée par Bergez et al. (2010) pour la conception d'itinéraires techniques par simulation. Il faut accompagner relativement tôt cette phase de conception *in silico* par une exploration des ressources génétiques disponibles.

Dans un second temps, il faut prévoir une évaluation expérimentale des variétés issues de la sélection afin de vérifier le bien-fondé des hypothèses initiales et le degré d'atteinte des critères recherchés.

Pour chaque cahier des charges, des critères d'évaluation sont définis et hiérarchisés. Il s'agit d'établir des indicateurs permettant de juger du niveau de satisfaction de chacun des objectifs du cahier des charges. Cette grille sert à évaluer les idéotypes produits et à ne conserver que ceux qui présentent un niveau de satisfaction global du cahier des charges acceptable. Pour établir ce niveau de satisfaction global, différentes méthodes d'évaluation multicritères pourront être mobilisées (DEXi, surclassement de synthèse...). Cette évaluation permet aussi d'identifier les éléments du cahier des charges qui nécessitent un travail supplémentaire, elle peut amener à modifier la représentation conceptuelle de l'étape précédente et alimenter ainsi une boucle de progrès. Nous voyons ici qu'il est important que les objectifs listés dans le cahier des charges soient définis de manière assez exhaustive pour que l'évaluation puisse se faire sur une gamme de critères suffisamment large. En effet, si, pour des raisons pratiques, la conception d'un idéotype est généralement fondée sur quelques objectifs identifiés comme prioritaires dans le cahier des charges, tous les objectifs donnent lieu à une évaluation et permettent ainsi d'accéder à une connaissance plus fine de l'idéotype produit. L'élargissement des services écosystémiques attendus de l'activité agricole pourrait, par exemple, diversifier dans l'avenir les critères d'évaluation des idéotypes variétaux.

Un exemple de conception d'idéotypes pour le pois d'hiver

La culture de pois, malgré ses intérêts multiples (réduction des émissions de GES, économie d'azote dans la rotation, fourniture de protéines pour l'alimentation animale et humaine, diversification) a connu une réduction drastique de ses surfaces en France : de 700 000 ha (1993) à environ 100 000 ha aujourd'hui. Cette culture est également caractérisée par une forte instabilité et une faible progression des rendements en culture, la rendant peu attractive pour les producteurs. Le contexte

d'accroissement des stress hydriques et thermiques augmente de plus cette instabilité, la culture y étant particulièrement sensible. Face à ces constats, le pois d'hiver, alors très peu cultivé en France, est apparu comme présentant des atouts : allongement de la durée du cycle (*a priori* favorable au rendement), décalage du cycle reproducteur vers des périodes moins fréquemment affectées par les stress abiotiques. Mais les variétés alors disponibles étaient sensibles au gel et, de ce fait, devaient être semées assez tard en automne (mi-novembre) ; or à cette période, où le sol est généralement très humide et favorable au tassement lors des opérations de semis. Le pois étant très sensible à des états structuraux du sol compactés, la sélection s'est orientée vers la recherche de variétés à période de semis plus précoce. On ne connaissait pas alors les conséquences possibles de l'avancement des semis sur les attaques d'ascochytose, les infestations d'*Aphanomyces*, et la gestion des mauvaises herbes à l'échelle de la rotation. Par ailleurs, des hypothèses de charges de travail dans les exploitations agricoles pouvaient laisser supposer que les dates de semis de ces nouvelles variétés de pois pourraient ne pas être aussi précoces que souhaitable avec de ce fait une réduction possible des bénéfices attendus.

Les programmes de sélection ont été initiés dès l'identification d'un gène de réactivité à la photopériode (Hr), permettant de maîtriser la date d'initiation florale (et donc la résistance au gel par le retard de floraison). Une double question (de la part des sélectionneurs et des agronomes) a alors été posée : (i) quelles caractéristiques devraient avoir ces variétés Hr pour maximiser les bénéfices attendus (quelle date de début floraison ? quelle durée de floraison ?), et (ii) les bénéfices attendus risqueraient-ils d'être remis en cause par des dates de semis contraintes par l'organisation du travail dans les exploitations agricoles ?

Des travaux de modélisation ont alors été engagés pour répondre à ces deux questions. Le modèle Afila, alors disponible sur pois de printemps, a été adapté au pois d'hiver, via la prise en compte de nouveaux facteurs limitants *a priori* attendus sur pois d'hiver (tassement du sol, gel, nutrition azotée limitante), et via la prise en compte de la variabilité génétique existant sur les traits d'intérêt (Vocanson et al., 2006a, 2006b). Ce nouveau modèle de fonctionnement d'une culture de pois, Afisol, a ensuite été couplé avec un modèle d'organisation du travail et d'évolution de la structure du sol selon les conditions de travail dans l'exploitation, afin de déterminer les risques de tassement du sol sur pois et sur les autres cultures de la succession, et les conséquences induites sur le rendement du pois selon le type variétal retenu dans l'exploitation (Jeuffroy et al., 2012). Enfin, le modèle d'évolution des populations d'adventices Alomysys a également été utilisé pour simuler les conséquences du choix variétal du pois sur les dynamiques d'évolution des mauvaises herbes à moyen terme, dans des successions à base de céréales et de colza (Munier-Jolain et Collard, 2004). Enfin, pour prendre en compte des facteurs limitants importants, dont les connaissances étaient encore trop partielles, un modèle décisionnel qualitatif basé sur DEXi (Bohanec et al., 2013) a été mobilisé.

L'utilisation du modèle Afisol a permis de montrer que les variétés Hr présentant les meilleures performances seraient

des variétés à floraison très précoce (autour du 20 avril), et à comportement reproducteur très indéterminé (fabriquant un nombre d'étages florifères très élevé). Le couplage de ce modèle avec les modèles d'organisation du travail et d'état structural du sol a montré que les performances attendues des variétés pouvaient être très différentes selon que les contraintes de l'exploitation agricole étaient prises en compte ou non (Jeuffroy et al., 2012).

Simultanément, des essais chez les sélectionneurs ont montré que certains phénotypes apparaissaient mieux adaptés à la tolérance à l'hiver : port en rosette, nombreuses ramifications, taille réduite des organes foliaires, développement rapide au printemps. De même, des travaux en pathologie ont permis de progresser sur l'idéotype défavorable au développement de l'ascochytose : plante haute, faible surface foliaire, bonne tenue de tige et insertion haute des organes fructifères, conduite du couvert permettant de maximiser la porosité et l'aération (densité de semis, date de semis, résistance à la verse) (Andriveau et al., 2013 ; Richard et al., 2013).

Des collections de ressources génétiques et de mutants ont alors été analysées pour identifier les sources de variabilité génétique disponible sur les caractères d'intérêt (résistance à *Aphanomyces* et à l'ascochytose, tolérance au gel, architecture et phénologie de la plante), et des marqueurs ont été mis au point pour la sélection. Des génotypes combinant les caractères d'intérêt ont été construits et évalués dans des réseaux d'essais, conduisant à l'identification de nouveaux processus nécessitant des travaux complémentaires : meilleur durcissement en cas de gel, anticipation de la date de début floraison, plus grande stabilité de la résistance à l'ascochytose.

En combinant des connaissances de génétique, d'écophysiologie, de pathologie et d'agronomie, issues des scientifiques, de la modélisation, et des experts de terrain, ces travaux ont permis de préciser les caractéristiques que devraient *a priori* avoir de nouvelles variétés de pois d'hiver pour réduire le risque d'être soumises aux facteurs limitants principaux rencontrés auparavant dans les cultures de pois chez les producteurs, ainsi que les caractéristiques des conduites techniques favorables (notamment la plage de dates de semis recommandées). Ces idéotypes ont inspiré les programmes de sélection en cours en contribuant à préciser les cibles. Les premières variétés de ce type Hr ont été inscrites très récemment et la sélection poursuit son travail par une amélioration progressive de ces types. Les travaux se poursuivent par la caractérisation des systèmes agricoles qui valoriseront au mieux ces nouveaux types variétaux. Les temps de réponse de la sélection étant longs, il n'est pas encore possible de tirer un bilan global de cette expérience, notamment en terme d'adoption par les producteurs.

Cet exemple montre l'importance d'avoir une démarche pluri-disciplinaire pour aborder cette question de l'idéotype à construire. De même, elle illustre les allers-retours permanents qui sont nécessaires entre l'acquisition de connaissances sur des processus constituant *a priori* des obstacles au développement de nouveaux idéotypes, et la construction-évaluation de prototypes des idéotypes définis.

Conclusion

Pour le sélectionneur, l'idéotypage permet donc de raisonner la sélection de manière plus formalisée et détaillée que la sélection traditionnelle sur objectifs globaux (souvent le rendement final). Ce mode de sélection séquentielle consiste également à faire des choix prioritaires (traits cibles) et non à viser une multiplicité d'objectifs de sélection. Concept utile ou dépassé ? Le débat est régulièrement ravivé parmi les sélectionneurs (Hamblin, 1993) mais le concept de Donald reste toujours opératoire pour analyser l'intérêt de sélectionner tel ou tel trait dans un environnement donné (Zhu et Zhang, 2013).

Pour le chercheur, la conception d'idéotypes offre l'opportunité d'une approche pluri-disciplinaire associant l'économie de l'innovation, les mathématiques appliquées, la génétique, l'agronomie, la pathologie végétale, et l'écophysiologie. Elle permet de revisiter les concepts d'interaction génotype x environnement x conduite et s'appuie sur les méthodes de conception développées pour les systèmes agricoles (boucles conception-évaluation).

Elle permet d'organiser la réflexion sur la création et le conseil variétal au sein des filières : identification des besoins (agriculteurs, coopératives, transformateurs), fixation d'un objectif pour la sélection (traits recherchés, exploration de la variabilité génétique...), méthodes d'évaluation. Dans ces domaines, les outils et méthodes restent encore largement à construire.

Bibliographie

Andriveau, D., Giorgetti, C., Baranger, A., Calonnec, A., Cartolaro, P., Faivre, R., Guyader, S., Lauri, P.E., Lescourret, F., Parisi, L., Ney, B., Tivoli, B., Sache, I., 2013. Defining and designing plant architectural ideotypes to control epidemics? Eur. J. Plant Pathol. 135, 611-617

Asseng, S., Turner, N.C., Ray, J.D., Keating, B.A., 2002. A simulation analysis that predicts the influence of physiological traits on the potential yield of wheat. Eur. J. Agron. 17, 123-141

Bergez, J.E., Colbach, N., Crespo, O., Garcia, F., Jeuffroy, M.-H., Justes, E., Loyce, C., Munier-Jolain, N., Sadok, W., 2010. Designing crop management systems by simulation. Eur. J. Agron. 32, 3-9

Bohanec, M., Rajkovič, V., Bratko, I., Zupan, B., Žnidaršič, M., 2013. DEX methodology: Three decades of qualitative multi-attribute modelling. Informatica 37, 49-54

Casadebaig, P., Debaeke, P., 2011. Using a crop model to assess genotype-environment interactions in multi-environment trials. In: System Approaches to Crop Improvement (N. Halford & M. Semenov, eds). Aspects Appl. Biol. 107, 19-25

Cilas, C., Bar-Hen, A., Montagnon, C., Godin, C., 2006. Definition of architectural ideotypes for good yield capacity in *Coffea canephora*. Ann. Bot. 97, 405-411

Debaeke, P., Nolot, J.M., 2000. Testing crop management systems for sunflower in South-West France. Proc. 15th Int. Sunflower Conf., Toulouse, ISA, Vol.1, C 1-6

Debaeke, P., Nolot, J.M., Bataillon, P., Raffaillac, D., 2000. Evaluation d'itinéraires techniques pour le blé dur dans le

- Sud-Ouest de la France. In Durum wheat improvement in the Mediterranean region: new challenges (C.Royo, M.M Nachit, N. Di Fonzo, J.L Araus Eds). Options Méditerranéennes. Série A, 40, 587-590
- Debaeke, P., Quilot-Turion, B. (eds), 2014. Conception d'idéotypes de plantes pour une agriculture durable. Collection Ecole-chercheurs INRA, FormaSciences, FPN, INRA, 252 p
- Debaeke, P., André, T., Lorgeou, J., 2014. La notion d'idéotype de plante. In Debaeke P. & Quilot-Turion (eds). Conception d'idéotypes de plantes pour une agriculture durable. Collection Ecole-chercheurs INRA, FormaSciences, FPN, INRA-CIRAD, pp 41-56
- Desclaux, D., Nolot, J.M., Chiffolleau, Y., Gozé, E., Leclerc, C., 2008 Changes in the concept of genotype \times environment interactions to fit agriculture diversification and decentralized participatory plant breeding: pluridisciplinary point of view. *Euphytica* 163, 533-546
- Desclaux, D., Chiffolleau, Y., Nolot, J.-M., 2013. Du concept d'idéotype à celui de Realttype: Gestion dynamique des innovations variétales par une approche transdisciplinaire et partenariale. Exemple du blé dur pour l'AB. *Innovations Agronomiques* 32, 455-466
- Dickmann, D.I., Gold, M.A., Flore, J.A., 1994. The ideotype concept and the genetic improvement of tree crops. *Plant Breed. Rev.* 12, 163-193
- Donald, C.M., 1968. The breeding of crop ideotype. *Euphytica* 17, 385-403
- Fontaine, L., Rolland, B., Bernicot, M.-H. , Poirot, L., 2009. Des variétés rustiques concurrentes des adventices pour l'agriculture durable en particulier l'agriculture biologique. *Innovations Agronomiques* 4, 115-124
- Hamblin, J., 1993. The ideotype concept: useful or outdated? In: D.R. Buxton, R. Shibles, A. Forsberg, B.L. Blad, K.H. Asay, G.M. Paulsen, R.F. Wilson (Eds.), *International Crop Science I*, CSSA, Madison, Wisconsin, USA, pp. 589-597
- Hanocq, E., Jeuffroy, M.H., Lejeune-Hénaut, I., Munier-Jolain, N., 2009. Construire des idéotypes pour des systèmes de culture variés en pois d'hiver. *Innovations Agronomiques* 7, 14-28
- Haverkort, A.J., Kooman, P.L, 1997. The use of systems analysis and modelling of growth and development in potato ideotyping under conditions affecting yields. *Euphytica* 94, 191-200
- Herndl, M., Shan, C., Wang, P., Graeff, S., Claupein, W., 2007. A model based ideotyping approach for wheat under different environmental conditions in North China Plain. *Agricultural Sciences in China* 6, 1426-1436
- Jeuffroy, M.H., Vocanson, A., Roger-Estrade, J., Meynard, J.M. 2012. The use of models at field and farm levels for the ex ante assessment of new pea genotypes. *Eur. J. Agr.* 42, 68-78
- Jeuffroy, M.H., Casadebaig, P., Debaeke, P., Loyce, C., Meynard, J.M., 2014. Agronomic model uses to predict cultivar performance in various environments and cropping systems. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 34, 121-137
- Kadrani, A., Sidi, M.M.O., Quilot-Turion, B., Génard, M., Lescourret, F., 2012. Particle swarm optimization to design ideotypes for sustainable fruit production systems. *Int. J. Swarm Intelligence Res.* 3, 1-19
- Lauri, P.E., Costes, E., 2005. Progress in whole-tree architectural studies for apple cultivar characterization at INRA, France - Contribution to the ideotype approach. *Acta Hort.* 663, 357-362
- Loyce, C., Rellier, J.P., Meynard, J.M., 2002. Management planning for winter wheat with multiple objectives (2): ethanol-wheat production. *Agric. Syst.* 72, 33-57
- Loyce, C., Meynard, J.-M., Bouchard, C., Rolland, B., Lonnet, P., Bataillon, P., Bernicot, M.-H., Bonnefoy, M., Charrier, X., Debote, B., Demarquet, T., Duperrier, B., Felix, I., Heddadj, D., Leblanc, O., Leleu, M., Mangin, P., Meausoone, M., Dousinault, G., 2008. Interaction between cultivar and crop management effects on winter wheat diseases, lodging, and yield. *Crop Protection* 27, 1131-1142
- Martre, P., Quilot-Turion, B., Luquet, D., Ould-Sidi, M., Chenu, K., Debaeke, P., 2015. Chapter 14 - Model assisted phenotyping and ideotype design. In: Calderini D & Sadras VO (eds), *Crop Physiology. Applications for Genetic Improvement and Agronomy*. 2nd Edition, Academic Press, pp 349-373
- Messina, C.D., Podlich, D., Dong, Z., Samples, M., Cooper, M. 2011. Yield-trait performance landscapes: from theory to application in breeding maize for drought tolerance. *J. Exp. Bot.* 62, 855-868
- Meynard, J.-M., Debaeke, P., Dejoux, J.F., Saulas, P., 1997. Quelle sélection variétale pour une agriculture durable ? *OCL* 4, 426-430
- Meynard, J.-M., Jeuffroy, M.-H., 2006. Quel progrès génétique pour une agriculture durable ? *Les Dossiers de l'Environnement de l'Inra* n°30, 15-25
- Mock, J.J., Pearce, R.B., 1975. An ideotype of maize. *Euphytica* 24, 613-623
- Munier-Jolain, N., Collard, A., 2004. Grain legumes and weed management in crop rotations: Stakes and methodologies for reducing environmental impacts of weed control. Workshop AEP Grain legumes and the environment: how to assess benefits and impacts ? Zurich, 18-19 Nov.2004
- Peng, S., Khush, G.S., Virk, P., Tang, Q., Zou, Y., 2008. Progress in ideotype breeding to increase rice yield potential. *Field Crop Res.* 108, 32-38
- Qi, R., Ma, Y., Hu, B., de Reffye, P., Cournede, P.H., 2010. Optimization of source-sink dynamics in plant growth for ideotype breeding: A case study on maize. *Comput. Electron. Agr.* 71, 96-105
- Quilot-Turion, B., Ould-Sidi, M.M., Kadrani, A., Hilgert, N., Genard, M., Lescourret, F., 2012. Optimization of parameters of the 'Virtual Fruit' model to design peach genotype for sustainable production systems. *Eur. J. Agron.* 42, 34-48

Rasmusson, D.C., 1987. An evaluation of ideotype breeding. *Crop Sci.* 27, 1140-1146

Rasmusson, D.C., 1991. A plant breeder's experience with ideotype breeding. *Field Crops Res.* 26, 191-200

Richard, B., Bussière, F., Langrume, C., Rouault, F., Jumel, S., Faivre, R., Tivoli, B., 2013. Effect of pea canopy architecture on microclimate and consequences on ascochyta blight development under field conditions. *Eur. J. Plant Pathol.* 135, 509-524

Roumet, P., Debaeke, P., Gauffreteau, A., Lorgeou J., 2014. Mettre en évidence de manière expérimentale des interactions G x E x C. In Debaeke P. & Quilot-Turion B. (eds). Conception d'idéotypes de plantes pour une agriculture durable. Collection Ecole-chercheurs INRA, FormaSciences, FPN, INRA-CIRAD, pp 81-111

Sedgley, R.H., 1991. An appraisal of the Donald ideotype after 21 years. *Field Crops Res.* 26, 93-112

Semenov, M.A., Stratonovitch, P., 2013. Designing high-yielding wheat ideotypes for a changing climate. *Food and Energy Security* 2, 185-196

Suriharn, B., Patanothai, A., Boote, K. J., Hoogenboom, G., 2011. Designing a peanut ideotype for a target environment using the CSM-CROPGRO-Peanut Model. *Crop Sci.* 51, 1887-1902

Socias, R., Felipe, A.J., Gómez Aparisi, J., García, J.E., Dicenta, F., 1998. The ideotype concept in almond. *Acta Hort.* 470, 51-56

Van Bueren, E.T.L., Struik, P.C., Jacobsen, E., 2002. Ecological concepts in organic farming and their consequences for an organic crop ideotype. *Neth. J. Agric. Sci.* 50, 1-26

Vocanson, A., Roger-Estrade, J., Boizard, H., Jeuffroy, M.H., 2006a. Effects of soil structure on root development of pea (*Pisum sativum* L.) according to the sowing date and the cultivar. *Plant Soil* 281, 121-135

Vocanson, A., Jeuffroy, M.H., Roger-Estrade, J., 2006b. Effect of sowing date and cultivar on root system development in pea (*Pisum sativum* L.). *Plant Soil* 283, 345-358

Voisin, A.S., Bourion, V., Duc, G., Salon, C., 2007. Using an ecophysiological analysis to dissect genetic variability and to propose an ideotype for nitrogen nutrition in pea. *Ann. Bot.* 100, 1525-1536

Zeven, A.C., 1975. Editorial: idiotype and ideotype. *Euphytica* 24, 565

Zheng, B., Chenu, K., Dreccer, M.F., Chapman, S.C., 2012. Breeding for the future: what are the potential impacts of future frost and heat events on sowing and flowering time requirements for Australian bread wheat (*Triticum aestivum*) varieties? *Global Change Biol.* 18, 2899-2914

Zhu, L., Zhang, D.-Y., 2013. Donald's ideotype and growth redundancy: a pot experimental test using an old and a modern spring wheat cultivar. *PLoS ONE* 8(7): e70006. doi:10.1371/journal.pone.0070006.

Coévolution des notions de Génotype, d'Environnement et de leurs interactions : approche participative et pluridisciplinaire

Co-evolution of notions of Genotype, Environment and their interactions: participatory and pluridisciplinary approach

Dominique DESCLAUX^{1*} - Yuna CHIFFOLEAU²
Jean-Marie NOLOT³

¹ Inra- UE 0398- DiaScope- Domaine de Melgueil - 34130 Mauguio

² Inra- UMR Innovation - 2, Place Pierre Viala - 34060 Montpellier Cedex 2

³ Inra- UMR Agir - 24, chemin de Borde-Rouge - CS 52627 - 31326 Castanet Tolosan

*Auteur correspondant : dominique.desclaux@supagro.inra.fr

Résumé

Variétés et systèmes de culture sont, dans cet article, abordés sous l'angle de la coévolution des notions de Génotype (G), d'Environnement (E) et de leurs interactions.

Plusieurs disciplines confrontent leurs points de vue en ciblant l'analyse sur l'évolution de la perception des G et E par les acteurs de l'amélioration des plantes.

Entre la définition officielle actuelle de la variété « produit commercial dont l'obtenteur doit contrôler l'utilisation et se garantir de contrefaçons » et la définition de « bien commun » qu'elle avait autrefois, l'histoire avance... au gré des perceptions que les Hommes ont de leur environnement agro-écologique et social. Le E classiquement structuré en année x lieu (YxL) et conduite de culture (C), devient E intégrant les diverses composantes socio-économiques (RxMxSxA) (Règlementation x Marché x Société x Acteur). Par conséquence, le génotype G évolue ainsi que l'interaction GxE qui, de « résidu d'une analyse de variance » à minimiser, devient « objectif » à prédire et valoriser.

Ces diverses façons de penser les environnements et les variétés, encouragées par le développement de l'économie de la qualité, la diversification des agricultures et l'émergence de nouvelles valeurs sociétales, appellent à raisonner des schémas alternatifs au système conventionnel d'amélioration des plantes. La sélection participative est discutée ici non seulement en tant que niche d'innovation mais aussi comme vecteur de connaissance et de structuration de l'environnement agro-écologique et socio-économique. Elle forme un cas intéressant pour raisonner l'articulation entre reconnaissance des compétences individuelles et renouvellement du lien entre individus et collectif au cœur des dynamiques sociétales contemporaines, et pour appréhender la multiplicité des perceptions de G et de E entre les différents acteurs concernés.

Mots-clés

Interaction GxE, sélection participative, blé, coévolution.

Abstract

Varieties and cropping systems are here approached by the way of the coevolution of notions Genotype (G), Environment (E) and of their interactions.

Some disciplines confront their points of view by targeting the analysis on the evolution of G and E perception by the plant breeding actors.

Between the current official definition of the variety "commercial product for which the breeder has to check the use and to protect from imitations" and the previous definition of "common good", the history moves forward according to the perceptions the people have of their agro-ecological and social environments. E which was structured into year x location (YxL) and cropping system (C), becomes E integrating the diverse socioeconomic components (RxMxSxA) (Rules x Market x Society x Actor). Consequently, G evolves as well as the GxE interactions, which from "residual of analysis of variance" to minimize, becomes "objective" to predict and to value.

These diverse manners to think about the environments and the varieties, encouraged by the development of quality economy, the farming systems diversification and the emergence of new societal values, call for alternative systems of plants improvement. The participatory plant breeding is discussed here not only as an innovation niche but also as a vector of knowledge and structuration of the agro-ecological and socioeconomic environment. It trains an interesting case to join recognition of individual skills and renewal of the link between individuals and collective in the heart of the contemporary societal dynamics, and to dread the multiplicity of G and E actors' perceptions.

Key-words

GxE interactions, PPB, wheat, co-evolution.

Introduction

Partant du thème de ce numéro spécial sur les interactions variétés x systèmes de culture, des chercheurs de disciplines diverses (génétique, agronomie et sociologie) associent, dans cet article, leur regard afin de rendre compte, dans une première partie, comment les différents acteurs d'une filière végétale française perçoivent ces interactions et plus largement les interactions Génotype (G) x Environnement (E).

Dans une deuxième partie, ils présenteront la manière dont ces interactions s'inscrivent dans différents modèles d'agriculture en se dotant des outils et moyens de les contrôler et les valoriser. De la simple notion de GxE que les programmes de sélection cherchent à minimiser, en passant par la notion de G x Y(year) x L(location) puis par celle de GxExC (conduite de culture), il s'agira de montrer la nécessité d'intégrer la complexité systémique de l'interaction GxYxLxCxR(réglementation)xM(marché)xS(société)xA(acteur) et de discuter des démarches permettant de l'appréhender, à travers des schémas renouvelés d'amélioration des plantes intégrant notamment la sélection participative.

Ainsi sera abordée ici non pas uniquement la coévolution des variétés et des systèmes de culture, mais plutôt la coévolution de leurs notions perçues par des acteurs et des disciplines différentes. Des exemples empruntés aux céréales à paille et clairement positionnés dans un contexte français servent de toile de fond à l'ensemble de l'article.

Coévolution des notions de variété, environnement et de leurs interactions : points de vue de linguistes, historiens et anthropologues

En préambule, il paraît pertinent de présenter quelques homonymies. En considérant l'ensemble de ses champs d'application, il est à souligner que rien n'est plus varié que la définition du mot « variété » : en algèbre universelle, une variété est une classe équationnelle, c'est-à-dire une classe K non vide de structures algébriques de même signature qui satisfont un ensemble d'identités ; au niveau musical, la variété constitue un genre populaire, la différenciant de la musique classique ; en philatélie, une variété est une modification accidentelle de l'aspect d'un timbre-poste lors de sa fabrication et de son impression ; en linguistique, une variété est une forme de langue qui se distingue des autres formes de façon systématique et cohérente ; en biologie, elle est définie comme un groupe d'organismes similaires au sein d'une espèce, qui visiblement diffèrent des autres membres de cette espèce. Bien que comprenant le terme 'varié' en son sein, il s'avère que, quel que soit le domaine étudié, la variété apparaît intrinsèquement uniforme (une classe, un genre, une modification, une forme, un groupe d'organismes similaires). La diversité ou variation n'apparaît pas au niveau intra-variétal mais plutôt au niveau inter-variétal. Elle naîtrait donc de l'identification d'au moins deux variétés.

En Europe, jusqu'au 19^{ème} siècle, origine géographique et usages locaux constituent la carte d'identité de la variété cultivée. Son « morphotype » est maintenu conforme grâce au choix des semences que réalise l'agriculteur à la récolte pour la saison suivante. Sélection naturelle, migration, dérive et mutation sont les dynamiques biologiques et sociales impactant la parcelle cultivée et générant une relative variabilité entre individus. Au 20^e siècle, un tournant intervient de façon concomitante avec la mise en œuvre du Plan Marshall. Ce Plan dont le lancement a été contemporain de l'ISO (Organisation Internationale de Normalisation) en 1945 a fortement encouragé la standardisation industrielle et la diffusion d'un modèle homogène de développement. Le secteur agricole se calque sur le modèle fordiste industriel, par une segmentation claire des métiers. Le secteur semencier n'y échappe pas et la sélection devient affaire de spécialistes (Bonneuil et Thomas, 2009). Le lien direct entre l'amélioration de la plante cultivée et le paysan se rompt. L'organisation actuelle du secteur semencier autour d'instances officielles paritaires entre sélectionneurs, utilisateurs et pouvoirs publics est toujours identique à celle qui prévalait lors de leur mise en place en 1942. C'est en effet le 22 février 1942 que paraît le décret instituant le Comité Technique Permanent de la Sélection des plantes cultivées (CTPS) et mettant fin au Comité de Contrôle des Semences (CCS). Ce changement d'appellation en apparence anodin est en fait majeur. Il fonde « le passage de la notion de « semences » à la notion de « variété » pour en faire un véritable outil de travail, porteur du progrès agricole. » (Boulineau et Leclerc, 2013).

Co-évolution des notions de variété x environnement : point de vue de sélectionneurs

« L'histoire de la sélection, chez la plupart des espèces végétales améliorées, a conduit à une perte de diversité du peuplement végétal dans le champ de l'agriculteur en passant des variétés populations hétérogènes génétiquement aux variétés modernes souvent réduites à un Génotype » (Galais, 2013). Pour un sélectionneur, le terme « variété » est l'aboutissement de 15 à 20 ans de sélection et n'est prononcé que lorsque le clone, la lignée ou l'hybride a réussi les examens éliminatoires de la DHS⁶ et de la VATE⁷, organisés par le CTPS.

Dans les étapes précédentes du programme de sélection, le terme « génotype » (**G**) est plus largement usité. Cependant, sous son apparente simplicité, il recouvre, selon l'étape considérée, un sens tout à fait différent à l'instar du concept d'environnement (**E**) qui lui est associé (tab. 1).

Au démarrage d'un programme de sélection, le **G** est un idéotype nécessitant pour sa mise en œuvre la connaissance fine d'un **G** - ressource génétique utilisée en croisements -, qui devient **G** - effet principal - déterminé par sa valeur en ligne de pépinière (plantes individuelles), puis en micro-parcelle (peuplement végétal), pour finir **G** - variété commerciale et propriété intellectuelle.

En miroir de cette diversité de **G**, l'environnement **E** est différencié selon ses composantes agro-écologique et socio-économique.

Du **E** génome dans lequel sont introduits les gènes recherchés, jusqu'au **E** cible de diffusion, l'environnement agro-écologique caractérise les stations de sélection aussi bien que le réseau d'expérimentation. Le risque de ce découpage, le plus souvent implicite, du concept d'environnement agro-écologique est de perdre de vue la "zone d'inférence" associée au travail fait en stations, définissant l'ensemble des situations auxquelles les résultats seront généralisables (Clarck, 1999).

Parallèlement, le **E** socio-économique est d'abord contraint par une réglementation générale **R** puis segmenté selon le marché ciblé **M**, qui peut avoir aussi ses propres règles **R**, et repose sur des compétences et moyens spécifiques selon les acteurs **A** associés.

⁶ Distinction, Homogénéité, Stabilité

⁷ Valeur Agronomique, Technologique et Environnementale

Étapes	G	E agro-écologique	E socio-économique
Définition des objectifs de sélection	Idéotype Combinaison de caractères d'intérêt	YxLxC : situations culturales cibles homogénéité ou diversité et aléas	M : utilisation, qualité marché visé : aléatoire R : Réglementation : fixe
Création de variabilité	Ressources génétiques / Croisements Relation entre caractères et gènes d'intérêt	GxG : Contexte génomique Interactions entre gènes	R : Contexte d'accès aux ressources génétiques évaluées (publiques, privées)
Sélection	Effet principal G = Ad + Do + I Repérer les recombinaisons favorables	Station de sélection Discrimination et représentativité (zone d'inférence)	A : Compétences et moyens Contrainte d'efficacité, de professionnalisme
Évaluation et inscription	Lignées fixées Cotation du phénotype	Réseau expérimental Représentativité et discrimination	R : Réglementation Inscription certification du résultat
Diffusion	Variété commerciale, distincte, homogène et stable et présentant un progrès génétique...	Zone de démonstration, recommandation "zone d'inférence"	R : Protection des obtenteurs et usagers, M : marché (contrat, coût semence et conseil)

Légende : Ad valeur génétique additive, Do valeur de dominance, I valeur d'épistasie (cf. définition en note de bas de page n°3)

A acteurs, C conduites de culture, E environnement, G génotype, L lieu, M marchés, R Réglementation, Y année

Tableau 1 : Concepts de Génotype et Environnement associés à chacune des cinq étapes d'un schéma de sélection conventionnel (d'après Sperling et al., 2001)

Pour des raisons économiques, l'objectif majeur des programmes de sélection est en général de rechercher des variétés capables de diffuser très largement et donc adaptées à des méta- environnements. Cette recherche d'adaptation large conduit à minimiser les interactions **GxE**. Bien que ces interactions aient une réalité génétique, sous-tendue par des hypothèses de super dominance, de pléiotropie ou d'épistasie⁸, elles ne sont perçues par le sélectionneur qu'à travers un terme de l'analyse de variance, significatif ou non, représentant l'écart à l'additivité. Il signifie que « selon le milieu, l'ensemble des gènes d'un génotype ne s'exprime pas de la même façon » (Gallais, 1990). Ainsi, pour minimiser les interactions, le sélectionneur cherchera à structurer les **E**. Quelques possibilités les plus usuelles de structuration sont présentées ci-dessous.

Structuration spatio-temporelle de l'environnement E = Y x L

Une pratique courante en sélection est de réduire le terme **E** aux coordonnées **Y x L** (Année x Lieu) de l'espace dans lequel est placé l'essai. Il est alors usuel de chercher à regrouper les **E** en « macro-milieus » (méta-environnements) à l'intérieur desquels le sélectionneur espère que l'interaction est négligeable (Yan et Hunt, 2001). Les premières publications sur ce découpage du terme **E** apparaissent dans les années 50. Cela correspond aux pratiques actuelles d'homologation des variétés dans un territoire national

⁸ Le modèle de super-dominance sous tend que la plasticité d'un génotype, c'est-à-dire la variation de son expression selon l'environnement, serait une fonction décroissante de son degré d'hétérozygotie. Dans le cadre du modèle pléiotropique, la plasticité d'un génotype est fonction de l'expression différentielle d'un même gène dans différents environnements. L'épistasie permet d'expliquer que la plasticité d'un génotype est due à l'interaction entre des gènes qui déterminent l'amplitude de sa réponse aux effets environnementaux et ceux qui déterminent l'expression moyenne du caractère.

découpé en zones agro-climatiques (Réseaux Nord / Sud du CTPS) qualifiées homogènes, à l'intérieur desquelles sont pratiqués des essais multilocaux dont les résultats sont moyennés. Cette approche simpliste de catégorisation des environnements ne résiste pas à la nécessité d'une prise en compte plus fine de l'environnement.

En effet, si **E** intègre non seulement le climat et le sol, mais aussi la présence d'adventices et de bioagresseurs, il ne peut être déconnecté de la conduite de culture **C**.

Prise en compte de la conduite de culture : les IGEC français ou GxExM anglophone

La conduite de culture (**C**) (ou « management » (**M**) des anglophones) peut modifier ou contrôler **E** par le choix des rotations, dates de semis, fertilisation, irrigation, application de produits phytosanitaires. **C** contribue ainsi à atténuer ou exacerber les facteurs limitants de **E** selon que le sélectionneur souhaite exprimer le potentiel ou les limites des variétés **G**. L'IGEC (interaction **GxExC**) prend tout son sens car la variété contribue aussi à façonner l'environnement biophysique, par sa dynamique de colonisation du milieu, sa dynamique d'absorption de l'eau et de l'azote, son équilibre rendement qualité, sa vigueur végétative, sa compétitivité vis-à-vis des adventices, sa contribution au microclimat intra végétation plus ou moins favorable aux maladies, sa phénologie et sensibilité aux accidents climatiques ou parasites, etc...

Structuration de l'environnement E sur la base des génotypes G

Cette approche, largement utilisée par les biométriciens (Yates et Cochran, 1938 ; Finlay et Wilkinson, 1963), utilise la performance moyenne de l'ensemble des variétés dans un milieu pour le caractériser. **E** est alors décrit par **G**. L'index environnemental dépend dès lors du groupe de génotypes en test. On ne peut prédire ce qui se passera pour un nouveau milieu, sans y mesurer préalablement le rendement moyen avec les mêmes génotypes que ceux de l'expérimentation. La description de l'interaction **GxE** est aussi facilitée par la méthode appelée AMMI (additive main effectifs, multiplicative interactions) (Gauch, 1992), mais celle-ci ne permet pas davantage de prédictions.

Lorsque les environnements **E** sont structurés en méta-environnements (**YxLxC**), l'objectif du sélectionneur est de standardiser et d'uniformiser chaque **E**. En effet, le progrès génétique étant proportionnel à l'héritabilité du caractère recherché, le sélectionneur va chercher à maximiser l'héritabilité en réduisant la variance environnementale. Pour cela, il cherchera à adapter l'environnement **E** à **G**, en évitant tout facteur limitant. Il pourra ainsi jouer sur le mode de culture **C** par apport d'intrants ou d'irrigation notamment, de façon à compenser les variabilités des composantes **Y** et **L**.

Transition

Après ce point de vue de sélectionneur, pourraient être déclinés les points de vue de l'ensemble des acteurs d'une filière. Ainsi pour l'établissement multiplicateur, la variété serait un nombre d'hectares ; pour l'institut technique, un cultivar dans la base de données post-inscription ; pour la

coopérative, un volume dans un silo ; pour l'agréateur, un contrat ; pour l'industriel une matière première, et pour l'utilisateur final (le plus souvent les consommateurs), un produit pouvant avoir diverses caractéristiques nutritionnelles et culturelles, voire des usages non alimentaires. Pour épargner au lecteur une litanie sans fin, est ici présenté un point de vue qui nous semble non seulement intégrateur de l'ensemble d'une filière végétale mais aussi reflet plus global du contexte sociétal, à une période donnée. Le point de vue choisi est celui du CTPS, et pour ne pas le trahir, nous empruntons un grand nombre d'extraits à l'excellent article de Boulineau et Leclerc (2013). Les titres cherchent à croiser la perception de la variété et de l'environnement au CTPS, avec les dynamiques sociétales aux différentes époques (Bajoit, 2003, Martucelli, 2010).

Co-évolution des notions de variété x environnement au CTPS

Les années 30 : Reconstruction et spécialisation

La variété = Semence, l'environnement = Silo

Le comité de contrôle des semences (CSS) présent jusqu'en 1942, date à laquelle il est remplacé par le CTPS, ne s'intéresse pas aux variétés en tant que telles mais aux semences et à l'état des stocks au niveau national. Il est toutefois chargé de dresser une première liste des variétés de blé cultivées (« catalogue synonymique ») et définit les normes de qualité - pureté variétale et taux de germination - d'un « blé de semence ». Le décret du 8 juillet 1923 fixe les conditions d'inscription d'une nouvelle variété de blé. Le décret du 26 mars 1925 sur la répression des fraudes interdit la vente de semences de blé autrement que sous leur nom variétal tel qu'il est enregistré dans le registre.

Pour éviter les fraudes sur les semences, il apparaît nécessaire de décrire la semence et dès les années 30, sont rédigées les premières recommandations en matière d'études DHS (Distinction, Homogénéité, Stabilité). La cotation VAT (Valeur Agronomique et Technologique) n'apparaîtra que 20 ans plus tard.

Les années 60 : Productivité et technicité

La variété = Précocité, l'environnement = Région de culture

À cette période, apparaît, au CTPS, la segmentation par groupe de précocité et les variétés sont inscrites avec mention expresse de leur précocité. Cela permet « la mise sur le marché de variétés diversifiées répondant aux conditions régionales de culture » (Boulineau et Leclerc, 2013). Aujourd'hui encore, perdure au CTPS la possibilité d'évaluer les variétés de blé tendre en zone Nord ou en zone Sud de la France. La structuration du réseau d'évaluation variétale sur la précocité est plus fine pour le maïs (groupes de A à E) pour lequel le rendement est l'objectif dominant sous contrainte de températures suffisantes pour permettre la maturation du grain.

Les années 80 : Marchandisation et différenciation

La variété = Qualité, l'environnement = Marché

« Dans les années 1960-1970, la segmentation qualitative du marché blé tendre se résumait à une classification des blés

en blé panifiable ou blé fourrager. À partir des années 1980, l'évolution du règlement technique « Céréales à Paille » du CTPS a permis de distinguer les blés panifiables supérieurs (BPS), les blés panifiables courant (BPC) et les blés à autres usages (BAU), segmentation correspondant à la demande des marchés avec une orientation marquée vers les BPS. À partir des années 1990, la segmentation qualitative du marché devient l'objectif principal de la filière tout en maintenant productivité et régularité par des seuils adaptés à chaque classe technologique » (Boulineau et Leclerc, 2013). De la même manière, en blé dur, une grille de classement technologique toujours en vigueur permet de distinguer 5 classes : variété de qualité courante avec défaut majeur (BD), variété de qualité courante (BDM), variété ayant de bonnes caractéristiques en teneur en protéine et mitadinage (BDP), variété ayant de bonnes caractéristiques en indice de jaune, indice de brun et moucheture (BDC), variété sans défaut (BDHQ). Ce critère de qualité technologique n'a cessé, depuis les années 80, de prendre du poids dans l'évaluation variétale notamment sous l'influence de la filière aval présente dans la section céréales à paille du CTPS. La pondération par des malus ou bonus appliqués dans la cotation VAT des blés peut assez fortement influencer la décision finale d'inscription d'une variété. En blé dur, la prime qualité décidée au niveau européen renforce encore ce processus et une variété qui ne démontre pas *a minima* les caractéristiques technologiques d'un type BD ne peut prétendre être inscrite sur la liste des variétés donnant droit à cette prime.

Les années 90 : Société du risque et recherche d'adaptation

La variété = Tolérance, l'environnement = Pathogènes

« Les essais de rendement en céréales à paille et notamment en blé tendre sont conduits depuis de nombreuses années selon deux modalités : une conduite dans les conditions normales de culture de la région, une conduite sans traitement fongicide pour permettre aux maladies de s'exprimer. Les bonifications et pénalités instaurées en 1990 selon cet écart entre « traité » et « non traité » ont été renforcées en 1994. À ce dispositif s'est ajoutée l'étude des facteurs de régularité du rendement (FRR) comme la verse ou la résistance aux maladies appelée aujourd'hui tolérance aux bioagresseurs. La tolérance des variétés aux différentes races de rouilles, à la septoriose, à la fusariose, à la carie et au piétin verse est également évaluée depuis de nombreuses années dans des essais en contamination artificielle et dans les réseaux d'essais d'évaluation du rendement. Le principe des bonus/malus a été intégré dans les règles de décision et est toujours utilisé à ce jour » (Boulineau et Leclerc, 2013).

Les années 2010 : singularisation et diversité

La variété = Efficience, l'environnement = Azote

« Un dispositif a été mis en place à l'automne 2012 dans le cadre du réseau CTPS d'inscription des variétés de blé tendre pour évaluer l'efficience en azote des variétés. Au côté du réseau classique « traité/non traité » sont implantés 4 lieux d'essais conduits selon 3 modalités : 2 répétitions à la dose d'azote recommandée N, 2 répétitions à N-80, 2 répéti-

tions à N+40, l'objectif étant de caractériser pour chaque variété les besoins en azote à l'optimum de leur potentiel de rendement » (Boulineau et Leclerc, 2013).

Aujourd'hui, le site internet du GEVES⁹, dans sa page d'accueil du Service d'Etudes des Variétés, indique : « Une variété est un produit commercial, l'utilisateur doit pouvoir le reconnaître et l'obteneur contrôler son utilisation et se garantir de contrefaçons ».

L'évolution chronologique des perceptions de la variété et de son environnement au CTPS est un excellent reflet, bien que décalé dans le temps, des perceptions de l'ensemble d'une filière et permet d'imaginer les variétés disponibles à chaque époque pour les agriculteurs.

Co-évolution des notions de variété x environnement pour l'agriculteur

Dans le système officiel actuel, l'agriculteur a une première approche de la variété qu'il va cultiver au travers du catalogue national ou européen des semences et des plants. L'obtention de la prime qualité pour le blé dur ou de la certification agriculture biologique, est conditionnée à l'achat de semences certifiées, c'est-à-dire issues d'une variété inscrite au catalogue et dont la multiplication est placée sous contrôle du SOC¹⁰. Même si la prise en compte des critères de FFR¹¹ et de qualité est effective, le critère « productivité » reste perçu comme dominant dans la cotation des variétés. Il est à souligner que la perception que l'agriculteur a de son environnement va fortement influencer sur sa perception de la notion de variété et sur son choix variétal. Quatre cas permettront d'illustrer ce propos.

• 1^{er} cas : L'agriculteur adapte l'environnement de culture à la variété

L'environnement = des unités d'intrants

La variété = le progrès génétique choisi dans le catalogue français ou européen

Ce premier cas, en fort développement en France depuis les années 50, est symptomatique de l'arrivée de la mécanisation permettant l'intensification technologique. « Je me situe dès l'année 50, date à laquelle je faisais mes premiers pas dans ce métier [...] Produire du blé paraît facile, mais les rendements étaient faibles et irréguliers et le poids spécifique était le seul critère de qualité. Avec l'arrivée de nouvelles variétés et de techniques culturales (fertilisation, phytos), les rendements ont rapidement progressé. Pour le maïs, l'arrivée des hybrides vers 1950/55 n'a pas procuré de grosses améliorations du rendement, mais une augmentation des surfaces. Certes les performances génétiques étaient bonnes mais les rendements stagnaient comme pour le blé. C'est l'apparition de l'irrigation, puis d'autres facteurs tels la fertilisation, densité de semis, etc., qui vers 1965 déclencha la forte hausse de ceux-ci en passant de 50 à 75 qx/ha en 1980 pour grimper autour de 110 à 140 qx. » (comm. pers. de J. Lamouroux, agriculteur retraité du Tarn-et-Garonne, 2014).

Suite à l'enquête sur les pratiques culturales des agriculteurs réalisée par le Scees¹² en 2006, il ressort qu'« on comptabilise une moyenne de six traitements sur le blé : deux herbicides, près de trois fongicides, un régulateur de croissance et des traitements insecticides marginaux. Contrairement à la fertilisation, les forts rendements vont de pair avec une utilisation importante des produits phytopharmaceutiques : 8 traitements permettent d'aller au-delà de 90 quintaux de blé. » (Agreste, 2008).

Les agriculteurs recherchent des variétés qui valorisent au mieux ces apports d'intrants et démontrent un progrès génétique.

Ce cas correspond au modèle de sélection structurant de la trajectoire de modernisation de l'agriculture et reste d'actualité. En 2014, les agriculteurs ne manquent pas *a priori* de choix pour les grandes cultures dans le catalogue français qui propose 4408 variétés de 78 espèces différentes (tab.2) ou dans le catalogue européen qui surenchérit avec 22165 variétés appartenant à 86 espèces !

Groupe d'espèces de grandes cultures	Nombre d'espèces botaniques	Nombre de variétés
Betteraves et chicorées industrielles	3	390
Céréales à paille	11	843
Colza et autres crucifères	8	356
Lin et chanvre	4	88
Maïs et sorgho	4	1320
Plantes fourragères et à gazon	41	951
Plantes protéagineuses	4	111
Tournesol, soja, ricin	3	349

Source : site internet <http://cat.geves.info/Page/ListeNationale-consultation> juillet 2014

Tableau 2 : Nombre d'espèces et de variétés disponibles en 2014 dans le catalogue français des espèces et des variétés (plantes de grande culture)

La comparaison entre le catalogue français actuel et celui publié il y a environ 25 ans (1987) montre une évolution nette du nombre et du type d'espèces considérées. Quelques espèces telles le pois (*Pisum sativum* L.), le pâturin des prés (*Poa pratensis* L.), le trèfle incarnat (*Trifolium incarnatum*), les hybrides résultant de croisements avec *Festulolium* Asch, la phacélie (*Phacelia tanacetifolia*), le lotier corniculier (*Lotus corniculatus*), la fétuque ovine (*Festuca ovina* L.), le trèfle hybride (*Trifolium hybridum*), le brome cathartique (*Bromus catharticus*), l'avoine rude (*Avena strigosa* Schreb.), la vesce velue (*Vicia villosa*) et le sarrasin (*Fagopyrum esculentum* Moench) n'étaient pas présentes en 1987 et sont apparues ultérieurement dans le catalogue (Desclaux et Nolot, 2014).

Toutefois, ce modèle de sélection est « verrouillé » (Meynard et Messean, 2013) puisque seules les innovations allant dans le sens de la trajectoire modernisatrice et productiviste sont acceptées. Dans le contexte de développement d'une économie de la qualité (Allaire, 2002), basé sur une différenciation des firmes et des produits, des agriculteurs recherchent d'autres solutions.

⁹ Groupe d'étude et de contrôle des variétés et des semences (GEVES), groupement d'intérêt public regroupant le Ministère de l'agriculture, l'institut national de la recherche agronomique (INRA) et le groupement national interprofessionnel des semences et plants (GNIS)

¹⁰ Service Officiel de Contrôle et de certification, dépendant du GNIS. Le SOC est chargé de faire appliquer les règlements arrêtés par le Ministère de l'Agriculture pour la production, le contrôle et la certification des semences et plants.

¹¹ Facteurs de régularité du rendement : résistance à la verse, maladies...

¹² Service Central des Enquêtes et Etudes Statistiques

• **2^{ème} cas : L'agriculteur contractualise dans le cadre d'une filière intégrée**

L'environnement = Débouché ou marché visé (D)

La variété = kit imposé

Dans un contexte de segmentation du marché, l'agriculteur peut contractualiser avec un obtenteur et des acteurs de la filière aval, dans le cadre d'une filière intégrée de type club. Dans ce cas, le club définit les agriculteurs membres dans un bassin de production ciblé, fournit un kit comprenant la variété et son mode d'emploi (itinéraire de culture) et demande l'exclusivité de livraison de la récolte. La variété en question est soit inscrite au catalogue dans le cadre de la liste VUIR (variétés à usage industriel réservé), ou non inscrite puisque la réglementation le permet dans la mesure où il n'y a pas de commercialisation de semences. « Comme les semences ne sont à aucun moment mises sur le marché, nous avons obtenu une dérogation pour ne pas avoir à les inscrire au catalogue. On économise ainsi cinq ans de tests officiels et quelques millions d'euros. » (Limagrain, cité par Omnès, 2010). L'assurance de rachat de la récolte à un prix garanti est le principal critère d'acceptabilité par l'agriculteur du kit **G x C x M** (variété, conduite de culture, marché). Les interactions contenues dans le kit (**G x C x M**) sont totalement sous la dépendance d'un **M** (cahier des charges, contrat) figé. Un exemple est celui de la filière intégrée mise en place par Limagrain. « Au fil de son développement, Limagrain a construit en Auvergne une « filière blé » complète : création variétale, production en filière tracée par les adhérents de la Coopérative, collecte et stockage, mise au point de recettes associant différentes variétés de blés, transformation en farines, fabrication de produits par la société Jacquet-Brossard » (source : site internet de la société¹³, 2014).

• **3^{ème} cas : L'agriculteur revendique une certaine autonomie**

L'environnement = sa ferme

La variété = son patrimoine

Ce cas émergeant à la fin des années 90 est marqué par une revendication forte de droits individuels et de maîtrise de l'ensemble de la chaîne depuis la production des semences jusqu'à la valorisation du produit fini. Certains paysans-boulangers ou paysans-pastiers l'illustrent parfaitement.

Le paysan est ici à la recherche de ressources génétiques à caractère patrimonial, identitaire, pouvant devenir des variétés fanions, emblème d'un mouvement contestataire, ou « variétés sentinelles » telles qu'exhibées par l'association Slow Food réunissant des « militants du goût ». La variété **G** qui les intéresse est un phénotype typé, estampillé « population de pays » ou « variété ancienne ».

Le **E** considéré est l'environnement de la ferme et l'interaction **GxE** cristallise à l'extrême la relation une variété – un agriculteur. C'est donc l'adaptation individuelle et hyper locale, à l'échelle de la ferme voire de la parcelle, qui est recherchée. La sélection redevient « paysanne », voire disparaît quand l'amélioration des plantes est appréhendée comme de l'« eugénisme végétal » (Le Guyader, 2006). « Les

paysans doivent pouvoir disposer d'une multitude de variétés les plus adaptables possibles, c'est-à-dire ouvertes à diverses évolutions successives, donc peu homogènes et peu stables » (Kastler, 2006). Pour cela, les moyens mis en œuvre sont simples, pouvant aller de la culture de populations soumises à sélection naturelle jusqu'à une pression de sélection massale légère en passant par la gestion dynamique. L'évaluation et la diffusion se font non pas sur des critères de progrès génétique mais sur une notion de satisfaction des consommateurs avertis et de singularisation des produits issus des variétés sélectionnées.

Dans ce modèle, l'interaction **GxE** se confond avec **PxA** (Phénotype x Agriculteur).

Si ce cas illustre la quête identitaire des acteurs caractérisant la société post-moderne, il entre en tension avec un renouveau du lien individu-collectif qui marque également l'évolution de la société (Bajoit, 2003) et explique l'émergence d'un autre système alternatif.

• **4^{ème} cas : L'environnement considéré est un collectif d'acteurs, la variété recherchée est multifonctionnelle**

Ce cas, plus récent, correspond aux projets de mise en place d'une approche holistique, visant à réaliser un difficile équilibre de durabilité du système de production en renouvelant les formes d'action collective. Ce modèle met tout autant en avant les interactions **G x E** agro-écologique (volet environnement de la durabilité) que **G x E** socio-économique (interactions entre acteurs). C'est donc le **GxCxYxLxA** (Génotype x Conduite de culture x Année x Lieu x Acteurs) qui est visé en interrelation avec **RxMxS** (Réglementation x Marché x Société) à redéfinir. L'organisation de ce système d'interactions complexes n'est possible que dans le cadre d'une démarche participative.

Initialement développée dans les Pays du Sud, la « sélection participative » intéresse aujourd'hui en Europe des projets locaux de création de variétés pour des environnements contrastés (agriculture biologique, faible intrants...) (Desclaux et al., 2012). Définie comme une démarche cherchant à associer tous les acteurs d'une filière, non seulement à la définition des objectifs de sélection, mais aussi à la conduite du processus même de sélection et de création variétale (Gallais, 2006), elle vise à répondre aux exigences et aux réalités systémiques diversifiées pour lesquelles la sélection conventionnelle semble peu adaptée.

Récemment, des idéotypes de blé dur conçus par des chercheurs intégraient des notions d'efficacité d'utilisation de l'azote et du phosphore pour satisfaire aux contraintes nutritionnelles fortes de certains systèmes de culture en Agriculture Biologique (AB). L'objectif était d'évaluer les ressources génétiques disponibles en focalisant sur ces caractères. Cependant, l'implication d'agriculteurs du Sud de la France, de collecteurs, de transformateurs et de consommateurs dans le projet a fortement modifié cet idéotype et finalement de nombreux critères liés à l'aptitude du blé dur à être cultivé en association avec des légumineuses ont été intégrés : équilibre de compétitivité, de précocité, problèmes de pertes à la récolte, tri post-récolte, qualité technologique et nutritionnelle de pâtes aux mélanges blés durs-légumineuses. Partant de cet exemple de cultures associées, Fares et al. (2012) ont tenté de comprendre les déterminants des verrous technologiques, souvent auto-entretenus et qui

¹³ Site source : <http://www.limagrain.com/activites/vie-des-societes/limagrain-presente-sa-filiere-%C2%AB-ble-%C2%BB-au-ministre-delegue-charge-de-lagroalimentaire/article-476/fr.html#VLUp9hWG24U>

empêchent la mise en place de nouvelles alternatives. Ces auteurs expliquent que le faible degré d'intégration de la filière blé dur peut être un des principaux déterminants empêchant l'adoption de nouvelles pratiques telles celle des cultures associées. La littérature sur les transitions socio-techniques montre que souvent le déverrouillage d'un système passe par la création de petites entités, fortement intégrées. Il ressort de cette action collective mobilisant plusieurs acteurs d'une filière, que l'idéotype de blé dur initialement envisagé par un cercle restreint, s'est peu à peu étoffé de nouveaux critères et a pu en temps réel être confronté à la réalité et aux contraintes de chaque acteur.

Focus sur la Sélection Participative qui permet de prendre en compte la complexité des interactions (de GxE à GxYxLxCxRxMxSxAx...)

Dans les conditions diversifiées de l'agriculture répondant aux exigences du développement durable, la sélection et l'évaluation doivent déboucher sur une gamme de variétés adaptées à une diversité d'environnements et d'objectifs de production. L'interaction **GxE** acquiert dès lors une importance particulière, car elle peut remettre en cause le choix d'un **G** quand on change de **E**. Ces environnements étant beaucoup plus variés que ce qu'aucune expérimentation ne permet d'explorer en un temps raisonnable, il est donc important de se donner les moyens de prédire l'interaction sur des milieux qui n'ont pas ou pas encore été expérimentés. Cette contrainte est la première source de divergence entre le schéma d'amélioration des plantes classiquement utilisé et celui de la sélection participative.

Une fonction renouvelée de la définition des objectifs de sélection

Les programmes de sélection participative cherchent, dès la première phase de programmation, à élaborer un cahier des charges intégrant la diversité des attentes et des représentations des variétés (tab.1). L'objectif d'amélioration des plantes est ici raisonné et négocié entre les différentes parties prenantes. Le progrès génétique, conçu dans le premier cas comme seul objectif à atteindre, n'est plus ici central ou du moins exclusif. Il se définit autrement, non plus comme un classement sur un seul index mais comme une diversité de performances de **G** décrites sur n index représentant une diversité de systèmes de culture. Ce n'est pas seulement l'amélioration de l'espèce qui est visée, mais surtout celle des conditions dans lesquelles elle est réalisée. L'évaluation porte ainsi autant sur l'objectif à atteindre que sur la façon de l'atteindre et vise à la reconnaissance à terme d'un progrès social ou éthique (Chiffolleau et Desclaux, 2006).

Dans cette phase, sont invités à collaborer : l'agriculteur fort de ses observations empiriques et de son expertise des relations **GxYxLxC**, le généticien connaissant outre les ressources **G**, les interactions **GxG** et leur évolution dans un contexte de brassage génétique, l'opérateur aval et le consommateur capable d'objectiver des critères technologiques et nutritionnels d'utilité dans les **GxM**, et le législateur faisant évoluer les **GxR**. La confrontation de ces représentations conduit à pondérer chaque interaction et qualifier le ou les idéotypes pertinents.

Cette première étape ne définit pas seulement des idéotypes, mais doit aussi structurer les environnements agro-écologiques et socio-économiques cibles, et la façon dont se dérouleront les étapes suivantes : moyens mobilisés, acteurs concernés et leurs rôles, ressources génétiques à explorer, consensus sur le compromis à trouver entre la puissance de discrimination (capacité à différencier les variétés) et la représentativité du lieu.

Un E agro-écologique à décrire et structurer pour apprécier sa représentativité

Dans les étapes de sélection et d'évaluation, le modèle conventionnel (1^{er} cas) privilégie la discrimination (critères de qualité et efficacité du travail en stations expérimentales), plutôt que la représentativité ou la proximité avec les lieux de production (reléguées à l'étape de diffusion). Pour les cibles plus diversifiées du 4^{ème} cas, la question de la représentativité se pose plus tôt en sélection, ce qui requiert une caractérisation plus fine des **E** agro-écologiques. La zone d'inférence, de diffusion (Clarck, 1999) doit être visible aux premières étapes, et les interactions **GxE** agro-écologiques ne doivent plus être seulement constatées, mais surtout rendues prévisibles et contrôlables.

Parmi les méthodes disponibles pour appréhender la représentativité des situations expérimentales, la méthode du diagnostic agronomique sur la base de génotypes révélateurs (Nolot, 1994) reprend le principe de caractérisation du milieu à l'aide de la plante elle-même. Le fait de ne pas se limiter aux variétés en test mais de se baser sur des génotypes bien connus pour révéler les caractéristiques des **E** agro-écologiques permet de ne plus réduire à une seule dimension les différences entre milieux¹⁴.

Sur ce point, les "modèles de culture" sur lesquels travaille la recherche agronomique sont très attendus pour représenter les relations dynamiques complexes entre **G** et **E** agro-écologique (lui-même modifié par **G**) et expliquer les interactions **GxE**. Ces outils de simulation permettront d'objectiver les cibles de sélection, en regroupant les **E** exprimant des combinaisons de facteurs limitants proches, et les idéotypes, définis par les paramètres variétaux du modèle optimisant le résultat de la culture dans chaque **E** cible. La représentativité des situations expérimentales est contrôlée par simulation du comportement des témoins révélateurs, et les réseaux de sélection et d'évaluation variétale sont structurés en raisonnant le choix des **C** conduites x **M** milieux. L'Agriculteur peut ainsi procéder au choix conjoint de la variété et de son mode de conduite (quel **G** pour tel **E**, ou quel **E** pour tel **G**?).

Un E socio-économique à structurer

La mise en place d'un réseau participatif pose la question du choix des partenaires, de leur représentativité et plus largement du type de dispositif permettant la construction d'une échelle de consensus sur les caractères d'intérêt : qui associer, quand et avec quels rôles ?

La sociologie des réseaux propose un moyen de dépasser les approches classiques structurant les acteurs et

¹⁴ Les variables mesurées sur ces génotypes peuvent servir de covariables environnementales dans des modèles de régression factorielle (Denis, 1980) ou permettre d'étendre le principe de la régression factorielle à un modèle écophysiologique (Dieng et al., 2006).

l'environnement en catégories ou fonctions (figées) et selon des rapports de domination (par les macro-structures). Il s'agit de modéliser l'environnement socio-économique à travers des « positions », appréhendées comme des ensembles d'acteurs hétérogènes mais ayant le même type de relations avec les mêmes autres et avec les objets (White, 1981). Ces ensembles ont en effet tendance à se comporter de façon comparable dans un contexte donné (valeur explicative et prédictive), au-delà de leurs différences de fonction ou de statut. L'approche peut ainsi être appliquée aux programmes de sélection (Chiffolleau, 2006) : l'enjeu est de prendre en compte différentes « positions », en tant que combinaisons particulières d'insertions dans 4 types de réseaux pertinents eu égard à l'usage des variétés : i) réseau socio-technique (relations avec les **G** à travers les pratiques techniques de sélection et de mise en culture), ii) réseau de conseil et de dialogue autour des variétés, iii) réseau marchand, iv) réseau institutionnel et politique autour des semences, variétés et produits issus des variétés. Dans la perspective d'un développement durable, il est nécessaire d'articuler ces différentes positions qui peuvent s'interpréter comme des ensembles spécifiques de relations et de pratiques, potentiellement complémentaires. Des accords partiels et contingents sur ce qu'il convient de faire et en particulier, de sélectionner, peuvent alors être envisagés ad hoc entre positions proches plutôt qu'à l'échelle du réseau entier.

La « participation » des agriculteurs, collecteurs, transformateurs, consommateurs, dans le processus de sélection devient importante quand elle permet de révéler différentes « positions » au service du projet commun. Les expériences sur le blé dur pour l'AB (Chiffolleau et Desclaux, 2006) montrent l'intérêt d'associer tous ces acteurs dans le processus de sélection pour permettre l'expression libre et *in situ* des pratiques, des valeurs, des réseaux associés aux variétés. La question de la « participation » rebondit alors sur celle de la décentralisation de certaines activités, dans un contexte où ce n'est plus le seul progrès génétique qui est visé. Au-delà de ses enjeux sociaux, la décentralisation de l'activité de sélection dans son ensemble (et non simplement des parcelles d'essai) mérite ainsi d'être posée ici dans le contexte nouveau d'un espace quasi infini de **E** de diffusion.

In situ - Ex situ - E centralisé ou E décentralisé

La sélection conventionnelle, décrite dans le cas 1, est particulièrement efficiente dans les systèmes culturels agricoles comparables à ceux des stations expérimentales, mais elle s'avère peu adaptée lorsque les interactions **G x E** sont fortes. Dans le modèle décrit dans le cas 4, marqué par la logique de contrôler et valoriser les interactions **GxE**, la généralisation des résultats de sélection est difficile, d'autant plus que le **E** est considéré dans son acception large.

La question majeure en sélection participative est donc : que faut-il centraliser (en station expérimentale de recherche), que faut-il décentraliser ? Notre réflexion se basera sur la décomposition du terme **E**.

L'efficacité d'un lieu (**YxLxC**) de sélection est déterminée, d'une part, par la corrélation génotypique entre la performance d'un cultivar dans ce lieu et celle obtenue dans le lieu cible (représentativité et biais) et, d'autre part, par la préci-

sion avec laquelle les performances du cultivar sont mesurées dans ce lieu de sélection (héritabilité au sens large, variance expliquée et puissance de discrimination). Dès lors, un programme de sélection uniquement centralisé permettra de maximiser l'héritabilité locale, alors qu'une sélection décentralisée permettra de maximiser la corrélation entre environnement de sélection et environnement cible (Atlin *et al.*, 2001). Ainsi, raisonner globalement sur l'intérêt de la centralisation ou décentralisation de **E** est une affaire de compromis entre biais et variance expliquée. Le lieu « station de recherche » est puissant ou discriminant, mais d'autant plus biaisé que le caractère sélectionné est sous dépendance environnementale.

Des critères existent pour atteindre l'optimum en privilégiant le multilocal quand le biais augmente. À moyens constants, il est nécessaire de jouer sur le nombre de lieux et de répétitions par lieu. Globalement, rechercher une forte interaction **GxE** conduit à mettre en place de nombreux essais à peu de répétitions, au risque d'une dépense injustifiée si l'interaction est en réalité faible (Gozé, 1992).

L'écart entre le lieu de sélection et le **YxLxC**, milieu agro-écologique (sols-climat-conduite) cible, doit être représenté par des écarts de fréquence et d'intensité de facteurs limitants. Si ce milieu ne peut être simulé en station, il sera nécessaire de décentraliser des expérimentations.

La conduite de culture **C** répond aux objectifs que se fixe l'agriculteur en fonction de ses contraintes et est définie par ses « règles de décision », lesquelles varient selon les caractéristiques climatiques de l'année et les conditions économiques des marchés. Il est donc difficile pour un expérimentateur de représenter des choix d'agriculteur et la décentralisation paraît ici aussi indispensable. Cependant, si ces règles de décision et leur variabilité en fonction de **E** et **M** sont bien explicitées, il est possible de les appliquer en stations de recherche, et de maîtriser ainsi le biais expérimental. Finalement, dans un lieu **L** de station de sélection, avec une gamme judicieuse de **C**, il est possible de représenter une certaine diversité d'**E** agro-écologiques cibles, en passant par le diagnostic de facteurs limitants et en s'appuyant sur une simulation par "modèle de culture".

Si ces **E** sont validés par les acteurs **A** du programme (agriculteur, sélectionneur, industriel...) représentatifs des diverses « positions », leur participation peut avoir lieu sur la station de recherche, sur les champs des agriculteurs mais aussi à travers des entretiens individuels, groupe de travail, débats... Dans tous les cas, cela suppose des principes et procédures spécifiques facilitant une participation critique et non une implication passive ou alibi : transparence, démocratie, porte ouverte, respect des personnes (fondements de la coopération, Gide, 1921) ; règles connues par tous, formations/information (Friedberg, 1988), confidentialité, empathie (Long, 2001)... La sélection par les paysans eux-mêmes, sur leur propre ferme, favorise en général cette participation critique en les confrontant aux contraintes et limites de l'amélioration des plantes (Chiffolleau et Desclaux, 2006). Dans ces relations entre acteurs, le "modèle de culture" peut se faire outil de médiation...

Concernant les marchés visés **M** et les structures de coordination économiques et politiques **R**, sectorielles et territoriales qui se multiplient aujourd'hui, deux étapes peuvent être envisagées. Tout d'abord, audits et recueils

d'informations réalisés in situ permettent de lister et de pondérer des critères qui peuvent dans un second temps former des variables d'entrée dans les modèles de simulation économiques. Dans le cas 4, le **R**, règlement actuel d'inscription de variétés au catalogue, est appelé à évoluer pour permettre la création et l'utilisation de la diversité des **G** nécessaire pour répondre à la diversité des (**YxLxCxMxA**). Enfin, concernant les dynamiques sociétales **S**, l'enjeu est de permettre, dans la même dynamique, la reconnaissance d'individus compétents et le renouvellement du lien entre individu et collectif, pour approcher, in situ, la réalité d'un progrès génétique mais aussi éthique et social au cœur des évolutions de la société contemporaine (Bajoit, 2003).

Conclusion

Entre la définition officielle actuelle de la variété - produit commercial dont il faut se prémunir des contrefaçons - et la définition de bien commun qu'elle avait autrefois et revendiquée par certains aujourd'hui, l'histoire avance... au gré des perceptions que les hommes ont de leur environnement biophysique et social.

L'uniformisation des environnements encouragée par le modèle productiviste en agriculture et la société du début du 20^{ème} siècle a conduit à l'homogénéité des **G**, malgré le grand nombre de variétés présentes dans les catalogues, et a réduit l'interaction **GxE** à une source parasite d'imprécision (résiduelle).

Avec la remise en cause de ce modèle et l'affirmation de nouvelles valeurs sociétales, l'agriculture se diversifie et s'inscrit dans des environnements contrastés, représentés ici à travers quatre cas.

Si le deuxième cas forme une première alternative au modèle de sélection productiviste, il reste inscrit dans une logique marchande tout en instaurant de nouvelles hiérarchies : cette organisation ouvre la voie à deux autres cas, revendiquant, à travers la sélection, un réencastrement de l'économie dans la société et la participation des citoyens à la gouvernance des filières et de la recherche (Callon et al., 2001). Le 3ème cas se constitue autour d'une stratégie à la fois contestataire et identitaire, le 4ème s'inscrit dans un renouveau du lien individu-collectif, illustrant les tensions de la société post-moderne (Bajoit, 2003).

Dans des contextes environnementaux hétérogènes où la marge de manœuvre sur la conduite culturale **C**, plus limitée, ne permet pas de compenser systématiquement les facteurs limitants du milieu biophysique **YxL**, et où la diversité des utilisations ne permet pas de rester dans une logique de **G** homogène et passe-partout, la démarche de sélection va s'inverser et il s'agira alors d'adapter la variété **G** à une diversité d'environnements **E**.

La principale évolution est le passage du paradigme : « on adapte l'environnement (par apport massif d'intrants) à la variété » à celui de « on adapte la variété à l'environnement et à ses contraintes ». Modifiant profondément les représentations des variétés (**G**) et des systèmes de culture (**E**), cette évolution modifie de fait le statut de l'interaction **GxE**. De simple « constatation », que l'on cherche à réduire, elle devient « objectif » complexe que l'on cherche à prédire et à valoriser.

La sélection participative émerge finalement comme une niche à même de produire des innovations pertinentes pour une amélioration du modèle agricole dominant, à l'instar de l'agriculture biologique (Lamine et Bellon, 2009). Elle forme aussi un cas intéressant pour raisonner les conditions et modalités de l'articulation entre reconnaissance de citoyens compétents d'une part, au-delà des seuls chercheurs, et renouvellement du lien individu-collectif d'autre part, tension au cœur de la société contemporaine.

Bibliographie

Agreste, 2008- Les rendements du blé et du maïs ne progressent plus. *Agreste Primeur*. N°210- mai 2008

Allaire, G. 2002. L'économie de la qualité, en ses secteurs, ses territoires et ses mythes. *Géographie, Economie, Société*, n°4, pp. 155-180

Atlin, GN., Cooper, M., Bjornstad, A. 2001. A comparison of formal and participatory breeding approaches using selection theory. *Euphytica*. 122:463-475

Bajoit, G. 2003. Le changement social. Approche sociologique des sociétés occidentales contemporaines. Paris, Armand Colin

Bonneuil, C., Thomas, F. 2009. Gènes, pouvoirs et profits. Recherche publique et régimes de production des savoirs de Mendel aux OGM. 619p. Ed.Quae. ISBN : 978-2-7592-0161-7

Boulineau, F., Leclerc, C. 2013. Evolution des variétés au travers du Catalogue officiel. *Sélectionneur français*, 64

Callon, M., Lascoumes, P., Barthe, Y. 2001. Agir dans un monde incertain. Essai sur la démocratie technique, Paris, Le Seuil

Chiffolleau, Y. 2006. La sélection participative du Sud au Nord. In Quelles variétés et semences pour des agricultures paysannes et durables? *Dossiers de l'environnement de l'INRA* n°30, Paris, 186p

Chiffolleau, Y., Desclaux, D. 2006. Participatory plant breeding: the best way to breed for sustainable agriculture? *International Journal of Sustainable Agriculture*- 4 (2) 119-130

Clarck, EA. 1999. Tailoring research and extension to support ecologically sustainable agriculture. Professional development program of the northeast SARE group. http://www.plant.uoguelph.ca/research/homepages/elcark/ne_sare.htm. Cited 11 feb 1999

Denis, JB., Vincourt, P. 1982. Panorama des méthodes statistiques d'analyse des interactions génotype x milieu. *Agro-nomie* 2(3): 219-230

Desclaux, D., Ceccarelli, S., Colley, M., Navazio, J., Trouche, G., Aguirre, S., Weltzien, E., Lançon, J. 2012. Chapter 6- Centralized or decentralized breeding: the potentials of participatory approaches for low-input and organic agriculture. In E.T. Lammerts van Bueren, J.R. Myers (eds) *Organic Crop Breeding*, Wiley-Blackwell, 292p. ISBN 978-0-470-95858-2

Desclaux, D, Chiffolleau, Y, Nolot, J.-M. 2013. Du concept d'Ideotype à celui de Realtype : Gestion dynamique des Innovations Variétales par une approche transdisciplinaire et partenariale. Exemple du blé dur pour l'AB. *Innovations*

Desclaux, D., Nolot, J.-M. 2014. Chapter : 20. Does the Seed Sector Offer Meet the Needs of Organic Cropping Diversity? Challenges for Organic Crop Varieties . In *Organic Farming, prototype for sustainable agricultures*. S.Bellon, S.Penvern. Ed. Springer.ISBN 978-94-007-7926-6

Denis, J.B. 1988. Two-way analysis using covariates. *Statistics*, 19:123-132

Dieng, I, Gozé, E, Sabatier, R. 2006. Prediction of crop response by linearisation about control approximation . *CR., biol.* (ISSN 1631-0691) 329 (3): 148-155. Elsevier, Paris, France

Fares, M., Magrini, M.-B., Triboulet P., 2012. Transition agroécologique, innovation et effets de verrouillage : le rôle de la structure organisationnelle des filières. Le cas de la filière Blé dur. *Cahiers Agricultures* 21, 34-45

Finlay, K.W., Wilkinson, G.N. 1963. The analysis of adaptation in a plant breeding programme. *Aust. J. Agric.Res.*14, 742-754

Friedberg, E. 1988. L'analyse stratégique des organisations. Pour, numéro spécial, n°128

Gallais, A. 1990. Théorie de la sélection en Amélioration des Plantes. Ed. Masson. 588p.

Gallais, A. 2006. Préface. In J. Lançon, A. Floquet, E. Weltzien (eds), *Partenaires pour construire des projets de sélection participative*. Ed CIRAD. 207p

Gallais, A. 2013. Évolution de la diversité génétique des variétés de plantes cultivées. *Académie d'Agriculture de France - 2013. Séance du 23 janvier 2013*

Gauch, H.G. 1992 Statistical analysis of regional yield trials: AMMI analysis of factorial designs. Elsevier. Amsterdam, 278p

Gide, A., 1921. Manifeste de la coopération. *Revue d'Etudes Coopératives*, n°1

Gozé, E. 1992. Détermination de la dimension des réseaux d'essais. *Coton fibres Trop.* 47, 2:81-94

GEVES, 2014.
http://www.geves.fr/index.php?option=com_content&view=article&id=21&Itemid=330&lang=fr

Kamut, 2013 <http://www.kamut.com/fr/trademark.html>

Kastler, G. 2006. Les semences paysannes. In *Quelles variétés et semences pour des agricultures paysannes et durables? Dossiers de l'environnement de l'INRA n°30*, Paris, 186p

Lamine, C. Bellon, S. 2009. Transitions vers l'agriculture biologique. Pratiques et accompagnements pour des systèmes innovants. Dijon-Paris, *Educagri-Quae*

Le Guyader. 2006. In rapport d'activité- Comité d'éthique et de précaution de l'INRA et de l'IFREMER - COMEPRA - ed INRA

Limagrain, cité par Omnés. 2010. Sélection Limagrain : Des variétés sur mesure pour la boulangerie industrielle. Réussir Grandes Cultures Janvier 2010.
<http://www.pleinchamp.com/grandes->

[cultures/actualites/selection-limagrain-des-varietes-sur-mesure-pour-la-boulangerie-industrielle](#)

Long, N. 2001. Development sociology: Actor perspectives. London: Routledge

Meynard, J.-M., Messean, A. (coord.). 2013. Freins et leviers à la diversification des cultures. Etude au niveau des exploitations et des filières. Synthèse du rapport d'étude INRA, 52 p.,
<http://inra.dam.front.pad.brainsonic.com/ressources/afile/223799-6afe9-resource-etude-diversification-des-cultures-synthese.html>

Nolot, J.-M. 1994 . Parcours d'élaboration du rendement. In *CR Réunion Sci.gpe céréales*, Dijon, mars 94. ed INRA

Sperling, L, Ashby, J.A., Smith, M.E., Weltzien E., McGuire S. 2001. A framework for analyzing participatory plant breeding approaches and results. *Euphytica* 122:439-450

White, H.C. 1981. Where do Markets Come From ? *American Journal of Sociology*, 87 (3): 517-547

Yan, W, Hunt, L.A. 2001. Interpretation of Genotype x Environment Interaction for Winter Wheat Yield. In *Ontario Crop Science* 41:19-25

Yates, F, Cochran, W.G. 1938. The analysis of groups of experiments. *J.Agr.Sci.*,9:556-580.

Effets de la latitude sur l'expression du photopériodisme du mil et sorgho : Validation des cartes d'adaptation variétale au Mali

Aichata FOUNÉ - Mohamed SAKO^{1,3*}

Michel VAKSMANN²

Mamoutou KOURESSY⁴

¹ICRISAT - Boîte Postale 320 - Samanko - Mali

²CIRAD - Avenue Agropolis - 34398 Montpellier - France

³Université Paris 8 Vincennes-Saint-Denis - Département de Géographie - EDSS Saint-Denis - France

⁴IER, CRRA de Sotuba - Bamako - Mali

* Auteur correspondant: a.sako@cgiar.org

Résumé

Dans la zone soudano-sahélienne la variabilité climatique inter et intra saisonnière est importante et conditionne le potentiel de production des cultures. L'incertitude principale porte sur les dates de début et de fin des pluies. Le photopériodisme des variétés locales de mils et sorghos permet la synchronisation de la floraison avec la date moyenne de fin des pluies. La détermination des zones d'adaptation des géotypes nécessite la connaissance du développement phénologique qui dépend étroitement de la durée du jour et de la latitude du lieu de culture. Les modèles de croissance des plantes prennent insuffisamment en compte les effets de la latitude sur l'expression du photopériodisme. Un indice simple d'adaptation variétale basé sur l'écart entre les dates d'épiaison et de fin de la saison des pluies permet de générer des cartes d'adaptation variétale.

Une prospection variétale a été réalisée sur des transects latitudinaux dans 20 villages des zones d'adaptation de la variété de mil Bofoué et de la variété de sorgho Ceblen, deux variétés vulgarisées au Mali. Les variétés prospectées dans ces villages montrent un comportement phénologique similaire aux deux variétés témoins.

Ce résultat valide les limites latitudinales des bandes d'adaptation variétale au niveau des agrosystèmes villageois. Le concept de « précocité » des accessions est relatif et spécifique à chaque latitude. Nos résultats donnent une idée plus précise de la complexité des interactions Géotype x Environnement x Technique culturelle et permettent de comprendre les stratégies et techniques d'adaptation aux risques environnementaux adoptés par les paysans. Les outils cartographiques développés ouvrent de nouvelles perspectives en définissant le concept « d'adaptation spécifique » à chaque environnement dans les agrosystèmes villageois. Ces cartes permettent d'extrapoler notre connaissance de la variabilité du développement des variétés dans divers systèmes de cultures, et d'aider au processus de création et de diffusion de variétés aux niveaux local, national et régional.

Mots-clés

Phénologie, photopériodisme, Interaction Géotype x Environnement, Adaptation variétale, Agrosystème.

Introduction

Le sorgho (*Sorghum bicolor*) et le mil (*Pennisetum glaucum*) représentent 80% de la production céréalière totale de la zone et y assurent la sécurité alimentaire de plus de 100 millions d'Africains (Sagnard *et al.*, 2008). Entre 1990 et 2000, la production du sorgho et du mil a augmenté régulièrement, tandis que les rendements sont restés stables et faibles, voisins de 500 Kg/ha en zone sahélienne et de 1 t/ha en zone soudanienne (Clerget, 2004). Jusqu'à présent, c'est l'augmentation des superficies cultivées qui a permis de satisfaire l'augmentation de la demande mais la saturation progressive de l'espace rural et l'abandon de la culture itinérante rend nécessaire l'intensification des techniques et l'augmentation des rendements. En Afrique de l'Ouest, et principalement dans la zone soudano-sahélienne, la durée du cycle d'une plante est un caractère essentiel de l'adaptation au milieu (Kouressy *et al.*, 2008). Ceci est d'autant plus vrai dans ces régions où la variabilité inter et intra saisonnière est caractérisée par l'incertitude d'installation des dates de début et de fin des pluies (Sivakumar, 1988, Traoré *et al.*, 2007). Les programmes d'amélioration, pour développer des variétés plus productives avec une large adaptation géographique, ont cherché à introduire des variétés exogènes, précoces et productives, en négligeant les qualités propres à la biodiversité locale. Le nouveau matériel ainsi développé s'est révélé inadapté à l'usage. Les analyses de cet échec montrent à présent que plusieurs critères essentiels d'adaptation à l'environnement n'ont pas été suffisamment pris en compte, parmi lesquelles figure le photopériodisme.

En Afrique Soudano-Sahélienne, le début de saison est extrêmement variable d'une année sur l'autre, nettement plus que la date de fin des pluies. De nombreux sorghos et mils d'Afrique de l'Ouest sont photopériodiques ce qui leur confère un important avantage évolutif en modulant la durée du cycle en fonction de la variabilité interannuelle des dates de début de saison des pluies (Vaksmann, 1996, 1998 ; Craufurd *et al.*, 1999 ; Summerfield *et al.*, 1999). Ce caractère permet d'éviter de nombreuses contraintes biotiques (oiseaux, cecidomyies, *Atherigona soccata*) et limite l'occurrence des sécheresses terminales en évitant les floraisons trop tardives.

La floraison de variétés photopériodiques est généralement groupée dans les 20 jours qui précèdent la fin des pluies de leur zone d'origine (Kouressy *et al.*, 2008) quel que soit la date de semis. Un indice simple d'adaptation variétale basé sur l'écart entre la date d'épiaison de la variété et la date de fin de la saison (Soumaré *et al.*, 2008) peut être interpolé dans l'espace pour générer des cartes d'adaptation variétale.

Cette méthodologie utilise des modèles de développement pour prédire la date de floraison des différentes variétés en fonction du lieu de culture et de la date de semis. Toutefois, les modèles utilisés tels que DSSAT ou SarraH (Folliard *et al.*, 2004 ; Dingkuhn *et al.*, 2008) semblent avoir sous-estimé les effets de la latitude sur le développement des plantes. Des études récentes ont montré que les coefficients des modèles n'étaient pas stables avec la latitude (Abdulai *et al.*, 2012). Une variété pouvait avoir un comportement précoce insensible à la photopériode dans le sud de la zone étudiée et

devenir tardive et photopériodique dans le nord. En conséquence les aires d'adaptation prédites étaient imprécises et ne pouvaient pas être utilisées comme outils d'aide à la décision sans avoir été validées localement au préalable. Des essais conduits sur un large gradient latitudinal et sur un échantillon représentatif de cultivars de sorghos et mils photopériodiques montrent que l'effet de la latitude sur l'expression photopériodique des génotypes est proportionnel à la distance latitudinale entre le site d'essai et leur zone d'origine (Sako et al., en soumission).

L'objectif de cette étude est d'évaluer au niveau des agro-systèmes villageois, la validité des zones d'adaptation variétale prévues par le modèle et d'accéder à l'expertise paysanne locale en matière de choix variétale et de distribution spatiale des variétés en fonction du paysage.

Une validation participative des zones d'adaptations variétales des sorghos et mils photopériodiques au niveau de transects dans les agroécosystèmes villageois constitue une étape préparatoire nécessaire à l'élargissement du modèle à d'autres espèces présentant des traits d'adaptation similaires (Riz, Niébé, etc.), et à sa vulgarisation auprès des programmes de sélection et d'amélioration variétale en Afrique de l'Ouest.

Matériels et méthodes

Modèle de développement des sorghos et mils photopériodiques

Un modèle de prévision de la phénologie utilisant la température quotidienne et la durée du jour (Dingkhun et al., 2008) permet de simuler l'initiation paniculaire des variétés de sorgho et de mil photopériodiques. L'initiation paniculaire se produit lorsque la durée du jour descend en-dessous d'un seuil (spécifique à chaque cultivar) qui dépend de l'âge de la plante et de la température. Le modèle nécessite le calcul de trois coefficients variétaux qui ont été caractérisés sur un gradient latitudinal dans les stations agronomiques de Ndiol, Sénégal (16°02N), Sadoré, Niger (14°13N), Samanko, Mali (12°53N), Wa (10°05N), Ghana et Nyankpala, Ghana (9°02N) (Sako et al., en soumission).

Délimitation des zones d'adaptation variétales

Une variété de mil Bofoué (variété locale tardive, photopériodique) et une variété de sorgho Ceblen (variété locale épurée, tardive, photopériodique) largement diffusées au Mali ont été choisies pour la détermination de leurs zones d'adaptation au Mali (Tableau 1). Le modèle de développement permet de définir les zones d'adaptation de ces deux variétés (Figure 1 page suivante) selon la méthodologie proposées par Soumaré et al. (2008).

Id	Especie	Accession	Nom vernaculaire	Race / type (enregister)	Pays	Région	Localité	Ethnicité	Longitude	Latitude	Pluviométrie annuelle (mm)	Durée cycle moyen (jours)	Sensibilité à la Photoperiode
1	Mil	Variété locale	Bofoué	-	Mali	Segou	Tominian	Bwa	-4.59	13.28	600-800	84	élevé
2	Sorgho	CSM335	Ceblen	Guinea	Mali	Samanko / Mali	ICRISAT/IER	-	-8.08	12.53	800-1000	125	élevé

Tableau 1 : Délimitation des zones d'adaptation variétales

Matériels génétiques et sites de prospection variétale

Dans les zones d'adaptation précédemment définies, vingt villages situés à 50 km de part et d'autre d'un transect latitudinale ont été sélectionnés pour des enquêtes et des prospections variétales (Tableau 2 page suivante).

Enquêtes et prospections variétales

Deux phases d'enquêtes et de prospections variétales ont été réalisées en fonction du calendrier agricole comme suit :

i/ Une première phase d'enquêtes et de prospections de la prédominance variétale des deux accessions témoins à l'intérieur des limites latitudinales des zones d'adaptation variétale des sites à l'intérieur du transect d'étude durant la période dite de post-semis (Juillet).

ii/ Une seconde phase d'enquêtes et de prospections variétales de la distribution spatiale des accessions en fonction de la toposéquence et de la durée du cycle durant la période post-floraison (Octobre) dans les villages témoins de Bassala et de Fassa. Sur chacun des sites d'étude, les exploitations agricoles ont été choisies en fonction de leur disponibilité, de l'âge, de la taille de l'exploitation agricole et de sa localisation en fonction de la toposéquence.

Dans chacun des deux villages témoins, un échantillonnage représentatif d'exploitations d'agricoles (au moins 30% du nombre total d'exploitations agricoles référencées dans le village) a été établi par l'intermédiaire du chef de village et

de ses conseillers pour la réalisation des enquêtes et prospections variétales. Chaque paysan a fourni un échantillon des variétés qu'il cultive et a été soumis à un entretien semi-directif d'enquêtes décrivant l'origine (locale ou introduction récente), la provenance (lieu), le cycle de la variété (semis, floraison), les types de sol adaptés à la culture et la position de la parcelle de culture par rapport au paysage agricole du village. Un géo-référencement des parcelles indiquées a été effectué par l'équipe en présence du chef de l'exploitation agricole.

Au total, 166 chefs d'exploitations agricoles ont été enquêtés, représentant 295 parcelles géoréférencées. La collecte de 124 variétés de sorgho et de 102 variétés de mil a été réalisée.

Sites d'enquêtes et de prospections variétales - Bofoué - Axe I							
Id	Longitude	Latitude	Pays	Région	Cercle	Commune	Village
1	-7.98	14.22	Mali	Koulikoro	Kolokani	Sagabala	Doubabougou
2	-8.09	13.89	Mali	Koulikoro	Kolokani	Didieni	Didieni
3	-8.03	14.10	Mali	Koulikoro	Kolokani	Sagabala	Segue
4	-8.13	14.26	Mali	Koulikoro	Kolokani	Sagabala	Sirado
5	-7.52	13.93	Mali	Koulikoro	Banamba	Boron	Tiemabougou
6	-7.55	13.79	Mali	Koulikoro	Banamba	Madina-Sacko	Madina-Sacko
7	-7.86	13.80	Mali	Koulikoro	Kolokani	Kolokani	Ouolodo
8	-7.87	13.76	Mali	Koulikoro	Kolokani	Kolokani	Zambougou
9	-7.86	14.01	Mali	Koulikoro	Kolokani	Diedeni	Bassala
10	-8.01	13.69	Mali	Koulikoro	Kolokani	Kolokani	Tao-Zirakorobougou
Sites d'enquêtes et de prospections variétales - CSM335 (Ceblen) - Axe II							
Id	Longitude	Latitude	Pays	Région	Cercle	Commune	Village
1	-7.65	13.13	Mali	Koulikoro	Koulikoro	Koula	Koula-bambara
2	-7.63	12.83	Mali	Koulikoro	Koulikoro	Meguetana	Massala
3	-7.57	13.28	Mali	Koulikoro	Koulikoro	Sirakoroka	Sirakorola-Ouest
4	-7.67	13.18	Mali	Koulikoro	Koulikoro	Koula	Fassa
5	-7.80	13.49	Mali	Koulikoro	Kolokani	Massantola	Massantola
6	-7.94	13.06	Mali	Koulikoro	Kolokani	Nossombougou	Kodian
7	-7.73	13.05	Mali	Koulikoro	Koulikoro	Koula	Feloo-Bougoucoura
8	-7.84	13.10	Mali	Koulikoro	Koulikoro	Koula	Tiessembougou
9	-8.14	12.34	Mali	Koulikoro	Kati	Mande	Djoliba
10	-8.21	12.44	Mali	Koulikoro	Kati	Mande	Faraba

Tableau 2 : Liste des villages d'enquêtes et de prospections variétales

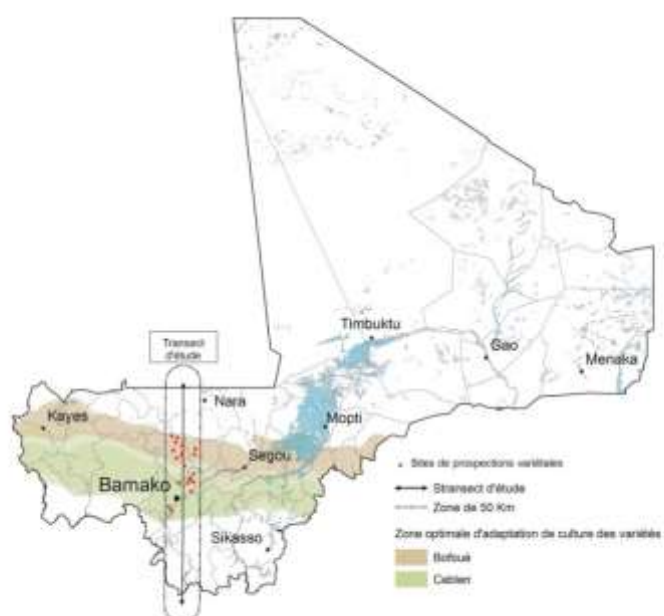


Figure 1 : Carte de localisation du transect d'étude et sites d'enquêtes et de prospection variétale au Mali

Figure 1 : carte de localisation du transect d'étude et sites d'enquêtes et de prospection variétale au Mali

Résultats et discussions

Prévalence variétale des bandes d'adaptation variétale

Les dates de semis pratiquées dans chaque village et les caractéristiques des variétés prospectées ont été déterminées par les enquêtes réalisées auprès des chefs d'exploitations.

Dans la zone d'adaptation de la variété de mil Bofoué, 70 échantillons de mils ont été prospectés et correspondent à 7 variétés identifiées par leur nom vernaculaire (Tableau 3a). Les variétés inventoriées sont photopériodiques, avec une durée moyenne de cycle de 75-85 jours pour un semis précoce du mois de Juin, et de 60-75 jours pour des semis tardifs de mi-juin à Juillet. Deux types de variétés de mil se côtoient dans la zone, les variétés de *Sanion* introduites et tardives (75-85 jours) et les *Souna* précoces (60-75 jours) considérés comme plus anciennement présents sur le village. Les semis se font essentiellement durant le mois de Juin, en moyenne à partir du 22 juin, avec une variabilité de 15 jours. Les variétés dites tardives sont semées en premier pour maximiser les rendements agricoles en fonction de la longueur de la saison des pluies. Les variétés à cycle court, dites précoces, sont semées en dernière position mi-juin à début-Juillet. Les floraisons surviennent en moyenne début septembre et varient de 11 jours et les périodes de récoltes

relatives en fonction des itinéraires techniques de chaque exploitation agricole s'effectuent en Novembre-Octobre.

Dans la zone d'adaptation de Ceblen, 142 échantillons de sorgho ont été prospectés et répartis en 18 variétés (Tableau 3b). La durée moyenne du cycle (semis-floraison) est de 94 jours, 110 jours pour les semis du mois de Juin et 80 jours pour les semis de mi-Juin et Juillet. Les variétés de sorgho prospectées sont photopériodiques. Seules les variétés *Seketana* et *Dereni soumalen* sont considérées par les paysans comme originaires des villages prospectés. Toutes les autres variétés sont considérées comme introduites soit en provenance d'une autre famille soit à partir d'une autre localité.

Les variétés de sorgho sont semées en moyenne mi-juin (± 14 jours). La diversité variétale des sorghos est plus significative que celle des mils. Néanmoins les dates de floraison se situent en Septembre avec une variabilité relative de ± 11 jours.

L'analyse des fiches d'enquêtes et de prospections variétales des mils et sorghos en fonction des axes d'étude révèle que, pour le semis du mois de juin, la phénologie des variétés prospectées est semblable à celle prévue par le modèle.

(a)	Nom vernaculaire	Origine	Type	Cycle	Date de semis	Date de floraison	Date de récolte	Durée cycle moyen (j)	Nb variété	% de variété
	Sanion	Introduite	P	Moyen	15-juin	5-sept.	24-nov.	82	7	10
	Sanion tjtjoni	Introduite	P	Moyen	19-juin	4-sept.	28-nov.	77	5	7
	Sanioni teli	Introduite	P	Long	8-juin	28-août	19-nov.	82	9	13
	Souna	Heritee	P	Court	16-juin	22-août	29-oct.	67	9	13
	Souna boua	Heritee	P	Court	25-juil.	25-sept.	15-oct.	62	1	1
	Souna sanion	Introduite	M	Long	17-juin	24-août	23-nov.	68	13	19
	Souna tjtjoni	Heritee	P	Court	25-juin	29-août	4-nov.	64	26	37
	Moy.				22-juin	2-sept.	11-nov.	72		
	St.dev				± 15	± 11	± 16	± 9		
(b)	Nom vernaculaire	Origine	Type	Cycle	Date de semis	Date de floraison	Date de récolte	Durée cycle moyen*	Nb de variété	% de variété
	Bandoka	Introduite	P	Moyen	21-juin	12-sept.	26-oct.	83	43	34
	Dasigui	Introduite	P	Moyen	7-juil.	14-sept.	1-nov.	86	12	9
	Dereni	Introduite	P	Long	8-juin	20-sept.	13-nov.	104	27	21
	Dereni Djaiman	Introduite	P	Long	27-mai	30-sept.	15-nov.	126	1	1
	Dereni Soumalen	Héritée	P	Long	5-juin	15-sept.	25-nov.	102	2	2
	Dereni Teliman	Introduite	M	Court	15-juil.	24-sept.	15-nov.	71	2	2
	Dereniba	Introduite	P	Long	1-juin	2-oct.	30-nov.	123	1	1
	Fonsebougouka	Introduite	M	Moyen	25-juin	13-sept.	20-oct.	80	3	2
	Keninke	Introduite	P	Long	3-juin	30-sept.	17-nov.	119	2	2
	Keninke Telini	Introduite	P	Court	7-juil.	13-sept.	23-oct.	67	5	4
	N'gnogneblen	Introduite	M	Long	10-juin	20-sept.	27-oct.	102	1	1
	N'gnognefing	Introduite	M	Moyen	24-juin	19-sept.	1-nov.	88	15	12
	N'gnognefing Telini	Introduite	P	Court	24-juin	2-sept.	1-nov.	70	6	5

N'golofing	Introduite	P	Moyen	15-juin	5-sept.	21-oct.	82	1	1
Niodieni	Introduite	P	Long	18-juin	30-sept.	30-nov.	104	1	1
Safaibougouka	Introduite	P	Court	13-juin	30-août	17-oct.	78	4	3
Sanoudie	Introduite	M	Long	7-juin	15-sept.	10-nov.	100	1	1
Seketana	Héritée	P	Long	10-juin	22-sept.	15-oct.	104	1	1
Moy.				16-juin	17-sept.	5-nov.	94		
St.dev				± 14	± 10	± 15	± 18		

* en jour Julian

Tableau 3 : Caractéristiques phénologiques des principales prospections variétales des variétés de mil (a) et sorgho (b)

Adéquation entre période de floraison et fin de pluies

Une variété est adaptée au climat si la floraison débute dans les 20 jours qui précèdent la fin moyenne de saison des pluies (Kouressy et al., 2008). Sur la base de ce concept, l'adéquation entre la date de floraison et la date moyenne de fin de saison (Moyenne 1951-2000 de la station de référence des sites) permet de valider les limites des bandes d'adaptation variétale définies par le modèle et d'évaluer le potentiel d'adaptation des dites variétés prospectées aux conditions climatiques et environnementales des villages.

Le tableau 4 illustre l'écart moyen entre la date moyenne de début des pluies et la date de semis pratiquée (début-Semis) et l'écart (Fin-Floraison) entre la date de fin de saison des pluies et la date de floraison des différentes variétés de mil

et de sorgho (b). Les variétés présentant une adaptabilité optimale fleurissent en moyenne dans les 20 jours qui précèdent la fin moyenne des pluies (Fin -Floraison compris 0 et 20 jours).

Dans la zone d'adaptation des variétés de mil, les variétés *Sanion*, *Sanion tjtjoni*, et *Souna tjtjoni* semblent les mieux adaptées avec des écarts à la date de semis de référence de 7, 3, -3 jours respectivement et des écarts à la date de floraison de 21, 22 et 28 jours respectivement (Tableau 4a). Dans la bande d'adaptation des variétés de sorgho, les variétés de sorgho *Bandoka*, *Dasigui*, *Dereni soumalen*, *Fonsebougouka*, *Keninke telini*, *Ngnognefing telima*, *Ngolofing* et *Sanoudié* sont les mieux adaptées avec des dates de floraison comprises dans l'intervalle des 20 jours précédant la date moyenne de fin de pluies (26 Septembre).

(a) Ecart moyen (d) à la date de début (d-Semis) et de fin (d-Floraison) de pluies						
Variété	Date de semis	Date de floraison	Date de récolte	Durée cycle moyen (jours)	Début - Semis	Fin - Floraison
Sanion	15-juin	5-sept.	24-nov.	82	7	21*
Sanion tjtjoni	19-juin	4-sept.	28-nov.	77	3	22*
Sanioni teli	8-juin	28-août	19-nov.	81	14	30
Souna	16-juin	22-août	29-oct.	67	6	36
Souna boua	25-juil.	25-sept.	15-oct.	62	-33	2
Souna sanion	17-juin	24-août	23-nov.	68	5	34
Souna tjtjoni	25-juin	29-août	4-nov.	65	-3	28*
(b) Ecart moyen (d) à la date de début (d-Semis) et de fin (d-Floraison) de pluies						
Variété	Date de semis	Date de floraison	Date de récolte	Durée cycle moyen (jours)	Début - Semis	Fin - Floraison
Bandoka	21-juin	12-sept.	26-oct.	83	1	15*
Dasigui	7-juil.	14-sept.	1-nov.	86	-15	13*
Dereni	8-juin	20-sept.	13-nov.	104	14	7
Dereni Djaiman	27-mai	30-sept.	15-nov.	126	26	-3
Dereni Soumalen	5-juin	15-sept.	25-nov.	102	17	12*
Dereni Teliman	15-juil.	24-sept.	15-nov.	71	-23	3
Dereniba	1-juin	2-oct.	30-nov.	123	21	-5
Fonsebougouka	25-juin	13-sept.	20-oct.	80	-3	14*
Keninke	3-juin	30-sept.	17-nov.	119	19	-3
Keninke Telini	7-juil.	13-sept.	23-oct.	68	-15	14*
N'gnogneblen	10-juin	20-sept.	27-oct.	102	12	7
N'gnognefing	24-juin	19-sept.	1-nov.	87	-2	8
N'gnognefingTelini	24-juin	2-sept.	1-nov.	70	-2	24*
N'golofing	15-juin	5-sept.	21-oct.	82	7	22*
Niodieni	18-juin	30-sept.	30-nov.	104	4	-3
Safaibougouka	13-juin	30-août	17-oct.	78	9	28
Sanoudie	7-juin	15-sept.	10-nov.	100	15	12*
Seketana	10-juin	22-sept.	15-oct.	104	12	5

*Variété bien adaptée aux conditions climatiques de la zone.

Tableau 4 : Ecart moyen (d) à la date de début (15 Juin) et de fin de la saison de pluies (26 Septembre) des stations météorologiques de référence

Distribution spatiale de la durée du cycle moyen

L'analyse des résultats des enquêtes dans les villages témoins de Bassala et de Fassa montre une répartition spatiale des parcelles des variétés de mil et de sorgho en fonction de la durée moyenne du cycle phénologique (Semis-Floraison). Le village de Bassala [13°59'28"N, 7°52'40"O, 384 m] est situé dans la région de Koulikoro, cercle de Kolokani, commune de Didieni. Village bambara de 34 exploitations agricoles, la culture du mil est l'une des principales activités. La répartition spatiale des parcelles de mil est conditionnée, entre autres, par la longueur du cycle de la variété (Semis-Floraison). Deux types de variétés de mil sont cultivés dans le village de Bassala, les variétés de mil *Souna* précoces et photopériodiques, dont le cycle varie entre 60 et 65 jours, et les variétés *Sanion*, de cycle intermédiaire et photopériodiques, avec 70 - 75 jours de durée semis-floraison. Les *Souna* sont cultivées dans les champs de case, plus faciles d'accès et riches en fumures organiques. Les champs de cases sont sur des sols argileux-sableux et limoneux-sableux, lourds et riches en matières minérales et organiques. Culture de soudure, les *Souna* sont cultivées essentiellement pour leur précocité eu égard au déficit pluviométrique de la région. Autrefois considérée comme culture de substitution, la culture du *Souna* est aujourd'hui devenue

essentielle pour assurer les besoins en nourriture des familles tout au long de l'année. Les *Sanion* sont essentiellement cultivées dans les champs de brousse en dehors du village sur des sols sableux et limoneux-sableux (Figure 2). Elles constituent la principale culture de rente et occupent une place prépondérante dans la production totale du mil. La diminution de la pluviométrie et l'irrégularité des dates d'installation des pluies ont favorisé l'abandon des anciennes variétés de *Sanion* photopériodiques tardives au profit des nouvelles variétés améliorées de *Sanion* moyennement photopériodiques plus ou moins adaptées au paysage local. Néanmoins les paysans restent fortement attachés aux anciennes variétés de mil locales dont certaines semences sont jalousement conservées et utilisées lorsque la saison commence tôt ce qui peut laisser prévoir une pluviométrie excédentaire. A l'instar des mils, les variétés de sorgho cultivées dans le village de Fassa [13°10'47"N, 7°40'13"O, 340] dans la commune de Koula suivent la même distribution spatiale. Les variétés à cycle court sont cultivées dans les champs à proximité du village contrairement aux variétés de sorgho tardives qui sont essentiellement localisées dans les champs de brousse et aux alentours des zones de dépression (marigots) riches en sols lourds et en matières minérales et organiques (Figure 2).

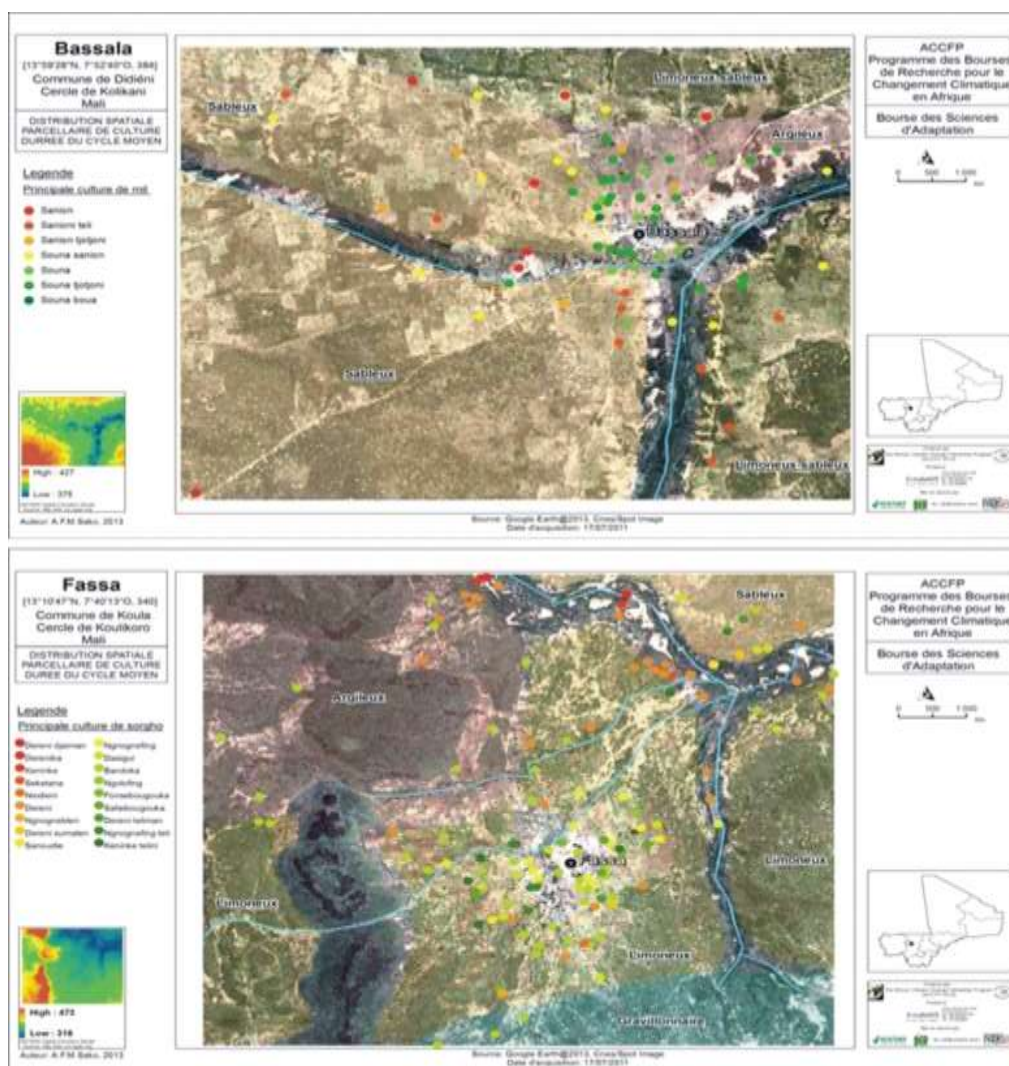


Figure 2: Distribution spatiale des parcelles de culture des variétés de mil à Bassala et de Sorgho à Fassa en fonction de la durée moyenne du cycle (Semis-Floraison)

Distribution des variétés sur la toposéquence

Le paysage agricole notamment la toposéquence influence fortement la distribution spatiale des variétés de mil et de sorgho. L'altitude dans le village de *Bassala* varie de 375 à 427 mètres (m). Les variétés de mil précoces sont cultivées en bas de toposéquence sur des sols sableux-argileux. Facile d'accès car proches des maisons, elles sont mieux entretenues et riches en apports de fumures organiques et de déchets domestiques et animaux. La proximité de ces parcelles permet aussi un meilleur gardiennage contre les oiseaux. Ces parcelles sont destinées essentiellement à des cultures de soudure. Les variétés de mil tardives sont

semées sur les champs en hauteur sur des sols sableux-limoneux à faible import d'engrais chimiques et de fumures

organiques propices au développement des variétés de mil tardives telle que les *Sanion*. Le coefficient de détermination entre les valeurs d'altitude et la durée moyenne des cycles des variétés de mil est de 0,50 avec un coefficient de corrélation positif significatif de 0,71* ($P=0.01$) (Figure 3a).

Dans le village de *Fassa*, contrairement aux mils, il existe une relation linéaire inverse entre l'altitude et la durée moyenne du cycle des variétés de sorgho. En effet, les parcelles des variétés de sorgho tardives sont localisées dans les bas-fonds sur des sols limoneux-argileux lourds et les variétés relativement précoces se situent sur les parties hautes du paysage agricole sur des sols limoneux. Le coefficient de détermination entre l'altitude et la durée moyenne du cycle est de 0,26 avec un coefficient de corrélation négatif de -0,52* ($P=0.01$) (Figure 3b).

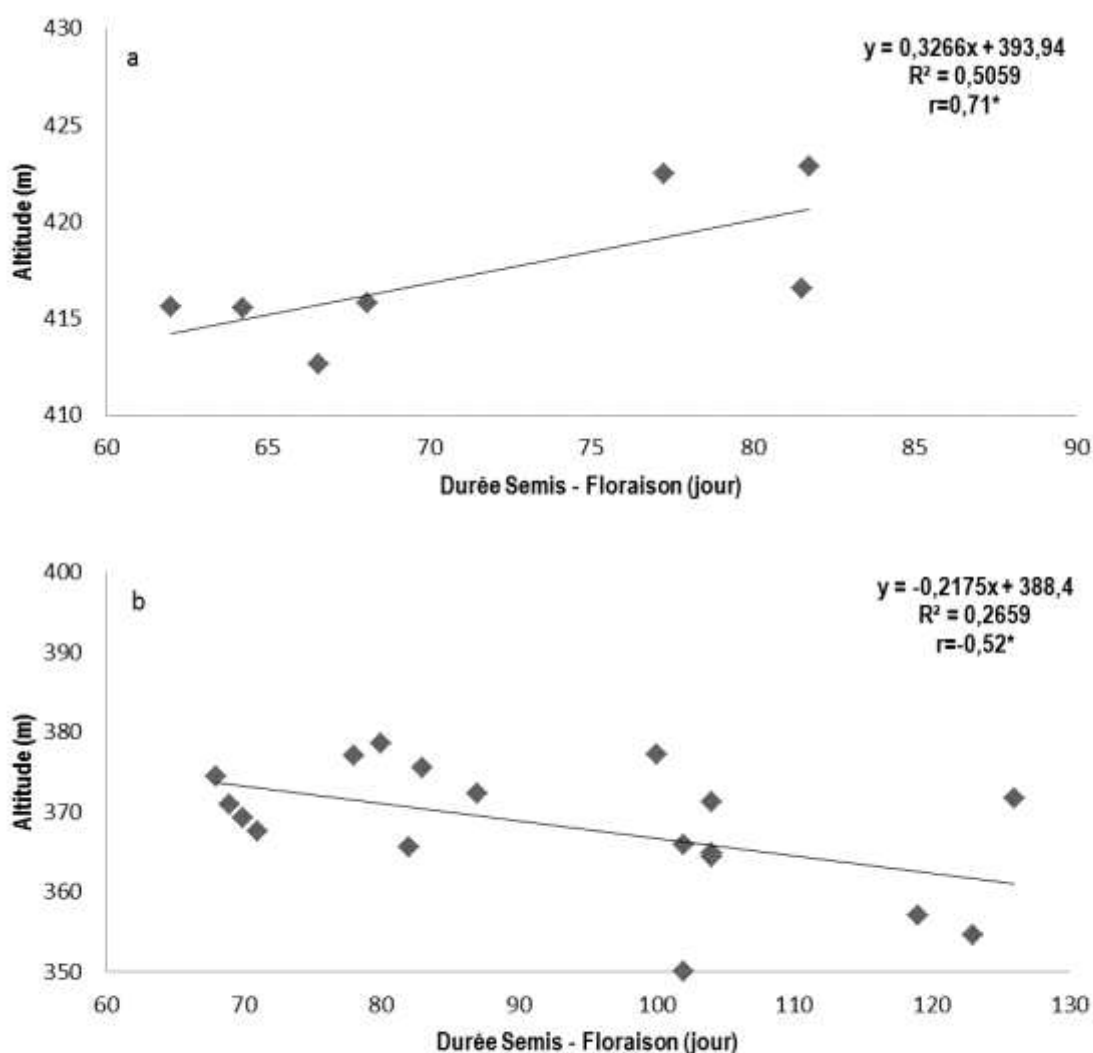


Figure 3: Relation en la durée moyenne du cycle et la valeur d'altitude des parcelles de mil (a) à Bassala et sorgho (b) à Fassa.

Conclusion

Au total, 166 chefs d'exploitations agricoles ont été enquêtés avec 295 parcelles géoréférencées. Un échantillonnage de 124 variétés de sorgho et 102 variétés de mil a été prospectées. L'analyse des prospections montre une prédominance

des variétés de durée moyenne de cycle (Semis-Floraison) similaire aux cycles des deux variétés témoins.

Les variétés de mil *Bofoué* et de sorgho *Ceblen*, recommandées par la recherche, n'existent dans aucun des villages prospectés probablement parce que les variétés locales sont très similaires phénologiquement et morphologiquement, ce qui ne justifie pas leur adoption. Les différentes variétés

de mil et de sorgho identifiées dans les villages ont des durées de cycle semblables aux variétés témoins et varient de ± 10 jours en moyenne en fonction des dates de semis. Ces résultats permettent de valider le concept de définition des zones d'adaptation variétale des variétés de mil et de sorgho photopériodiques au niveau des agrosystèmes villageois au Mali. L'introduction des cartes d'adaptation variétale auprès des paysans et des agents d'encadrement agricole est une démarche nouvelle qui, en facilitant les échanges avec les paysans, a permis d'accéder à l'expertise locale sur les stratégies et techniques d'adaptation variétale à la variabilité environnementale. Le concept d'adaptation variétale est complexe et intimement lié aux itinéraires techniques, aux paysages agricoles et principalement à la toposéquence, à la nature et au type de sol.

Les enquêtes des prospections variétales dans l'ensemble des exploitations agricoles des villages de *Bassala* et de *Fassa* ont permis d'identifier, de comprendre et de cartographier la distribution spatiale des parcelles de mil et de sorgho en fonction de la durée du cycle des variétés, de la nature du sol et de la toposéquence. Elles ont également permis de dégager les principaux facteurs explicatifs de la distribution spatiale des itinéraires techniques agricoles à des échelles plus fines pouvant s'intégrer dans des approches et processus de désagrégation spatiale des cartes d'adaptation variétale au niveau des agro-systèmes villageois. Les paysans des localités prospectées restent fortement attachés à la culture des variétés locales héritées et mieux adaptées aux conditions environnementales locales. Néanmoins dans les anciens villages de vulgarisation variétale une minorité de paysans enquêtés adoptent de plus en plus de nouvelles variétés introduites par les programmes de sélection et d'amélioration variétale. Par manque de sensibilisation et d'informations techniques, ces nouvelles variétés introduites ne répondent pas aux attentes des paysans car elles sont inadaptées aux itinéraires agricoles et conditions climatiques de leur localité. Pour les paysans la précocité est relative à la floraison des variétés locales et dépend donc du climat de la zone étudiée. Chaque variété de mil et de sorgho (introduite et/ou locale) répond à une date de semis précise et à des itinéraires techniques agricoles spécifiques. La valorisation des Interactions Génotype x Environnement x Technique culturale est un élément clé dans les stratégies agraires et un facteur majeur de stabilité des rendements agricoles dans les agrosystèmes villageois. Les agriculteurs des sites d'étude adoptent différents systèmes de culture afin de minimiser le risque d'une mauvaise récolte dans les conditions d'une agriculture à faibles intrants.

L'identification et l'étalement des dates de semis des cultures sur différents types de sols du paysage agricole est une stratégie importante pour éviter les pertes de rendement dues à la sécheresse en début de saison sur les hautes terres et à mi-saison des inondations sur la plaine. Nos résultats donnent une idée de la complexité des interactions à des échelles fines des stratégies et techniques d'adaptation variétale adoptés par les paysans à la variabilité climatique et environnementale. Ils fournissent une base de connaissance qui permettra de réaliser les processus de désagrégation des cartes d'adaptation variétale à des échelles plus fines au niveau des agrosystèmes villageois locaux. Les sé-

lectionneurs et les agronomes des programmes d'amélioration et de sélection variétale doivent formuler des objectifs spécifiques en prenant en compte ces interactions afin d'élaborer des processus de sélection et de vulgarisation variétale fiables, adéquates et spécifiques à chaque agrosystème villageois.

Bibliographie

- Abdulai AL., Kouressy M., Vaksman M., Asch F., Giese M., Holger B., 2012. Latitude and date of sowing influences phenology of photoperiod-sensitive sorghums. *Journal of Agronomy and Crop Science* 198:340-348
- Clerget B., Dingkuhn M., Chantereau J., Hemberger J., Louarn G, Vaksman M. 2004. Does panicle initiation in tropical sorghum depend on day-to-day change in photoperiod?. *Field Crops Research*. 88:21-37
- Craufurd PQ., Mahalakshmi F., Bidinger FR., Mukuru SZ., Chantereau J., Omanga PA. , Qi A., Roberts EH., Ellis RH., Summerfield RJ, Hammer GL., 1999. Adaptation of sorghum: Characterization of genotypic flowering responses to temperature and photoperiod. *Theoretical and Applied Genetics*. 99: 900-911
- Dingkuhn M., Kouressy M., Vaksman M., Clerget B., Chantereau J., 2008. A model of sorghum photoperiodism using the concept of threshold-lowering during prolonged appearance. *European Journal of Agronomy*. 28:74-89
- Folliard A., Traoré PCS., Vaksman M., Kouressy M., 2004. Modeling of sorghum response to photoperiod: a threshold-hyperbolic approach. *Field Crops Research*. 89:59-70
- Kouressy M., Dingkuhn M., Vaksman M., Heinemann AB., 2008. Adaptation to diverse semi-arid environments of sorghum genotypes having different plant type and sensitivity to photoperiod. *Agricultural and Forest Meteorology*. 148:357-371
- Sagnard F., Barnaud A., Deu M., Barro C., Luce C., Billot C., Rami JF., Bouchet S., Dembélé D., Pomiès V., Calatayud C., Rvallan R., Joly H., vom Brocke K., Touré A., Chantereau J., Bezançon G., Vaksman M., 2008. Analyse multi-échelle de la diversité génétique des sorghos : compréhension des processus évolutifs pour la conservation in situ. *Cahiers Agricultures*. 17 : 114-121
- Sivakumar MVK., 1988. Predicting rainy season potential from the onset of rains in Southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa. *Agricultural and Forest Meteorology*. 42: 295-305
- Soumaré M., Kouressy M., Vaksman M., Maikano I., Bazile D., Traoré PS., Dingkuhn M., Touré A., Vom Brocke K., Somé L., Barro K., Pulchérie C., 2008. Prévision de l'aire de diffusion des sorghos photopériodiques en Afrique de l'ouest. *Cahiers Agricultures*. 17:160-164
- Summerfield RJ., 1999. Timing it right: The Measurement and Prediction of Flowering. *Acta agronomica hungarica*. 47:203-213
- Traoré SB., Reyniers FN., Vaksman M., Kone K., Sidibe A., Yorote A., Yattara K., Kouressy M., 2000. Adaptation à la

sécheresse des écotypes locaux de sorghos au Mali. Sécheresse. 11: 227-237

Traoré PCS., Kouressy M., Vaksman M., Tabo R., Maikano I., Traoré S., Cooper P., 2007. Climate Prediction and Agriculture: What Is Different about Sudano-Sahelian West Africa?. In Sivakumar MVK and Hensen J (ed.) Climate Prediction and Agriculture. Berlin: Springer, pp. 189-203

Vaksman M., Traoré SB., Niangado O, 1996. Le photopériodisme des sorghos africains. Agriculture et Développement. 9: 13-18

Vaksman M., Traoré SB, Kouressy M., Coulibaly H., Reyniers FN., 1998. Etude du développement d'un sorgho photopériodique du Mali. p. 109-122 In Bacci, L., and Reyniers F.N. ed. Le futur des céréales photopériodiques pour une production durable en Afrique tropicale semi-aride. Actes du séminaire final. Florence.

Quelles perspectives offre la prise en compte des aspects spatio-temporels de la diversité génétique ?

Élargissement des échelles spatiales, quelques exemples pour les espèces oléagineuses

Xavier PINOCHET*

* CETIOM - Campus Inra/AgroParisTech - Avenue Lucien Brétignières, 78850 THIVERVAL GRIGNON - E-mail : pinochet@cetiom.fr

Les Agronomes raisonnent le plus souvent à l'échelle de la parcelle. Le choix de la variété est un élément important de l'itinéraire technique qui répond principalement à des objectifs de productivité, de protection contre des bioagresseurs de différentes natures et de qualité du produit final. La prise en compte de la dimension spatiale à une échelle plus large que celle de la parcelle est beaucoup moins fréquente. Néanmoins, cet élargissement d'échelle est rendu nécessaire pour aborder certaines questions impliquant des organismes mobiles tels que les insectes, ou des flux à distance de pollen ou de spores. Les 20 dernières années offrent quelques exemples intéressants de la prise en compte de ces échelles plus larges qui s'accompagnent souvent également de la prise en compte d'une dimension temporelle plus longue. On a alors des choix d'espèces ou de variétés qui s'intègrent dans des systèmes de culture. Ces choix sont interconnectés et ne peuvent alors se faire indépendamment. Ils se heurtent néanmoins à des questions de maîtrise de l'espace où cohabitent des acteurs différents n'ayant pas forcément les mêmes objectifs. Ces échelles élargies nécessitent également des innovations méthodologiques importantes, les approches factorielles, toutes conditions égales par ailleurs ne pouvant plus être mises en œuvre. En particulier, le recours à la modélisation devient nécessaire.

Les plantes cultivées sur une parcelle sont à la fois des émetteurs et des récepteurs de différents flux interagissant avec l'environnement de la parcelle. Ces flux entrants ou sortants peuvent être de différentes natures :

1) Des flux de pollen, variables selon les morphologies florales, avec des conséquences plus ou moins fortes selon le caractère allogame ou autogame de la variété et de l'espèce cultivée.

2) Des flux de graines, avec des conséquences ayant une dimension temporelle avec les questions de repousses, ou spatiale selon le mode de transport. Nombre et taille des graines produites sont alors des facteurs importants.

3) Des flux de bio-agresseurs. Il peut s'agir principalement de dissémination de spores de champignon, ou de mouvements d'insectes.

L'intervention lors de l'assemblée générale de l'Afa en Mars 2013 avait pour objectif d'illustrer ces questions à partir de quelques exemples relatifs aux cultures oléagineuses, colza principalement, et tournesol :

- La gestion durable des résistances variétales aux pathogènes : cas du Phoma du colza.
- Gestion des Repousses pour préserver une qualité en colza.
- Les flux de pollen en tournesol.
- La gestion spatiale des insectes et de leurs auxiliaires.

La gestion durable des résistances variétales aux pathogènes : cas du Phoma du colza

Les populations de pathogènes évoluent dans le temps et dans l'espace, qualitativement et quantitativement en fonction de différents facteurs de milieu. Elles évoluent en particulier sur leurs propriétés d'agressivité et de virulence en fonction des hôtes qu'elles rencontrent, et qui leur permettent ou pas de se multiplier. Le Phoma du colza, dû au champignon *Leptosphaeria maculans*, est l'une des principales maladies du colza. Une recrudescence importante des attaques s'est produite au début des années 90, après l'apparition des variétés à basses teneurs en glucosinolates. Assez rapidement, l'utilisation à grande échelle d'une résistance spécifique (Rlm1) a permis de contrôler la maladie. Cependant, quelques années après, cette résistance a été contournée (Rouxel et al., 2003). Certaines variétés sont redevenues sensibles suite à une évolution rapide des populations (Balesdent et al., 2006).

Le souci d'éviter de tels renversements de situation, la perspective de l'arrivée de nouvelles résistances spécifiques, et les progrès plus lents des travaux de génétique sur les résistances quantitatives, ont amené les acteurs de la recherche à s'intéresser aux moyens de gérer durablement l'utilisation des variétés et de leurs résistances au Phoma. Pour cela, différents leviers sont utilisables. À l'échelle de la parcelle, la nature des travaux du sol, le choix de la variété, de la date de semis, du calendrier de fertilisation azotée sont autant de facteurs permettant de moduler le risque de maladie (Aubertot et al., 2004). Dans le temps, la fréquence de retour du colza dans la rotation constitue également un élément de gestion du risque.

Néanmoins, ces éléments sont insuffisants et rapidement est apparue la nécessité de considérer une échelle spatiale plus large. Si les cinétiques spatialisées de dispersion des spores d'un pathogène sont difficiles à établir expérimentalement, leur dispersion à plusieurs dizaines, voire centaines de mètres, ne fait pas de doute. Dans ces conditions, la fréquence et la répartition des parcelles de colza dans le paysage, la nature des résistances portées par les variétés utili-

sées, et les pratiques agronomiques réalisées sur chacune des parcelles, sont autant d'éléments à prendre en compte pour concevoir des stratégies de gestion. La complexité des éléments à prendre en compte et les impossibilités matérielles d'expérimenter les stratégies envisagées dans des dispositifs de comparaison toutes conditions égales par ailleurs, nécessitent de disposer d'un outil permettant de balayer virtuellement différents scénarios. Les thèses d'Elise Pelzer puis de Laure Hossard ont permis de construire le modèle SIPPOM (Pelzer, 2008 ; Pelzer et al., 2010), de l'améliorer, puis de l'utiliser dans une démarche participative, pour construire, dans différents contextes, et avec les acteurs de terrain concernés, différents scénarios possibles de gestion (Hossard, 2012 ; Hossard et al., 2013). Si dans les quelques centaines de scénarios balayés, la fréquence de retour du colza sur une parcelle apparaît bien comme un facteur important déterminant la taille de la population du pathogène, la fréquence de la présence d'une variété portant une résistance spécifique efficace parmi les variétés cultivées dans le paysage considéré est un élément déterminant la fréquence d'individus virulents dans la population du champignon quelques années après. Malgré une communication technique régulière sur le sujet, les acteurs ont des difficultés à prendre en compte des échelles spatiales au-delà de leur propre parcelle ou exploitation. De nombreuses réticences s'expriment. Néanmoins, on notera l'intérêt grandissant des coopératives pour la caractérisation des populations de pathogène de leur secteur d'activité.

Gestion de la qualité en colza

Jusqu'au début des années 70, l'huile de colza était une huile majoritairement érucique (50 à 60% environ de C22-1). Après les mises en cause de cet acide gras dans certaines pathologies humaines, les améliorateurs des plantes ont fait évoluer le colza vers des colzas zéro érucique (ou 0), dans lesquels les longues chaînes de l'acide érucique ont été remplacées par l'acide oléique (C18-1). Néanmoins, l'acide érucique intéresse un marché non alimentaire dont les besoins portent sur plusieurs dizaines de milliers d'hectares (environ 15 000 ha en France ; entre 50 et 80 000 pour l'Union Européenne). La réforme de la politique agricole commune de 1992 a permis le développement sur jachère de ce type de production à usage industriel. Cependant, ces productions sous contrats doivent pouvoir coexister avec des parcelles de colza de commodité, sans que la qualité, teneur en acide érucique pour l'un et oléique pour l'autre, n'en soit affectée. À la même période, l'émergence des colzas OGM portant des caractères de résistance à un herbicide à large spectre a également posé cette même question de coexistence dans le paysage. Il fallait pouvoir garantir une qualité non OGM aux parcelles voisines. Malgré les travaux entrepris, ces OGM n'ont pas été développés en Europe essentiellement pour des raisons politiques.

Le colza est une espèce fortement autogame, avec néanmoins des variations selon les génotypes et les environnements. Par ailleurs les fleurs de colza constituent une ressource alimentaire précoce déterminante pour de nombreux insectes pollinisateurs, dont les abeilles. Même minoritaire, la part d'allogamie peut avoir des conséquences sur la qualité. Les insectes peuvent transporter le pollen sur des dis-

tances plus longues, bien que difficile à déterminer. Néanmoins, la moindre discontinuité de quelques mètres dans l'espace, comme la présence d'un chemin, limite beaucoup les effets de pollinisation par les insectes. Le pollen se disperse aussi par le vent mais sur des distances assez courtes, de l'ordre d'une trentaine de mètres (Klein et al., 2006). L'ensemble des études menées, en particulier pour répondre aux interrogations soulevées par l'arrivée des OGM, mettent en exergue le rôle clef des repousses comme facteur principal de dissémination d'un caractère particulier (OGM en l'occurrence). La graine de colza est petite (Poids de mille grains voisin de 4 grammes) et les pertes à la récolte relativement importantes (plusieurs milliers de graines par m², jusqu'à 5 quintaux par hectare selon les situations). Il y a donc un stock semencier à gérer ensuite dans la rotation, avec des plantes de colza qui peuvent repousser et réémettre du pollen si elles ne sont pas détruites, soit au sein d'une autre culture, soit lors du retour d'un colza sur la parcelle. Lorsque ce colza est différent (OGM, ou présentant un profil d'acides gras différents), la qualité de la culture peut être affectée. Par ailleurs, les transports liés aux récoltes amènent des pertes de graines le long des chemins et des routes, lieux également de développement de futures plantes, plus ou moins isolées, émettrices de pollen. On arrive donc rapidement à un ensemble complexe dans lequel interviennent à la fois des aspects spatiaux (parcellaire, routes et chemins) et des aspects temporels (rotations, nature des espèces cultivées), avec de fortes interactions avec les pratiques agronomiques de toutes natures.

Pour les mêmes raisons que pour l'exemple précédent (complexité des interactions, impossibilité d'expérimentations réelles de chaque facteur toutes conditions égales par ailleurs), le recours à la modélisation a permis aux agronomes d'imaginer et d'étudier des solutions de coexistence, OGM/non OGM, ou entre variétés présentant des profils d'acides gras différents. Ceci a conduit à la construction, à l'utilisation et à l'articulation de plusieurs modèles : GENESYS pour les processus biologiques ; LANDSFACTS pour l'allocation des cultures dans le temps et dans l'espace, et GENEXP pour la genèse de parcellaires virtuelles de géométries diverses. Ces outils permettent de définir les conditions dans lesquelles il est possible ou non de respecter des seuils de contamination, et de déterminer les combinaisons de mesures agronomiques les plus efficaces pour arriver à l'objectif en prenant en considération un maximum d'éléments du contexte climatique et agronomique, y compris les caractéristiques variétales du colza (Fargue, 2003). Les pratiques à risque peuvent être identifiées virtuellement par des séries de combinaisons de paysages, de part de colza dans celui-ci, de part de culture OGM, sous différents systèmes de cultures. Les confrontations réalisées entre les sorties du modèle, et les différents sites expérimentaux se sont avérées dans l'ensemble très satisfaisantes. Néanmoins, des points d'amélioration du modèle restent à faire, en particulier sur la description des stades phénologiques et sur les devenir des repousses sur les bordures. Pour un bilan synthétique du travail effectué, on pourra se reporter à la synthèse présentée par Nathalie Colbach lors du congrès colza de 2011 à Prague. Les barrières politiques n'ont pas permis la valorisation de ces travaux pour les questions de coexistence OGM/non OGM, par

contre des études ont été menées à la fois pour des questions de gestion des repousses en production de semences et pour la définition de cahier des charges à respecter en production de colza érucique pour éviter la dégradation de la qualité de la collecte par des repousses trop abondantes. Néanmoins, pour ces productions de colza érucique ou de colza haut oléique et bas linoléique, des considérations de logistique amènent les opérateurs à définir des îlots de production spécialisés.

Les flux de pollen en tournesol

En tournesol, la présence de types variétaux différents amènent également à prendre en considération des aspects spatiaux à échelle plus grande que la parcelle. Le premier type variétal à poser cette question a été le tournesol oléique, à partir du milieu des années 90. Ce type variétal occupe la moitié des surfaces depuis le milieu des années 2000. Le deuxième type variétal est constitué par les variétés résistantes à un herbicide à large spectre. En matière de tournesol, les repousses sont plus faciles à gérer, car facilement repérables par le caractère polyflore en F2. Par contre, l'espèce est *a priori* majoritairement allogame, bien que la recherche d'une stabilité du rendement ait pu conduire, au long des processus d'amélioration des plantes, à sélectionner indirectement des génotypes plus autogames. Néanmoins, les travaux entrepris ont donc surtout cherché à estimer les distances d'isolement nécessaires pour ne pas affecter la qualité ou minimiser le transfert de la mutation induisant la résistance à certains herbicides de la famille des inhibiteurs d'ALS. Pour les tournesols oléiques, plusieurs études ont été réalisées (Merrien *et al.*, 1993, Lagravère *et al.*, 1999). Elles montrent qu'à partir d'une cinquantaine de mètres, la pollinisation par du pollen linoléique de parcelles voisines n'affecte plus la teneur en C18:1 de la parcelle oléique.

L'émergence de variétés de tournesol dites VTH, résistantes à un herbicide de la famille des inhibiteurs d'ALS, a été l'occasion de poser la question d'un transfert du caractère vers d'autres tournesols ne possédant pas ce caractère ou vers des populations de tournesols sauvages polyflores. Une expérimentation a été conduite en 2008 au CETIOM avec une variété de Tournesol Clearfield (résistante à l'Imazamox) placée au milieu d'un champ de tournesol classique, contaminé avec des populations dénombrées de tournesols sauvages dans la parcelle ainsi qu'en bordure (4 plantes sauvages par m²). Les tournesols sauvages ont une floraison de type indéterminée avec dans cette situation 45% de leurs capitules synchrones en floraison avec le tournesol Clearfield cultivé. Des prélèvements ont été réalisés sur des capitules de Tournesols sauvages au sein du couvert de Tournesol Clearfield, sur des capitules de Tournesols sauvages voisins dans le couvert de la variété de tournesol classique, ainsi que plus loin dans les bordures du champ. La présence de la mutation responsable du caractère a été faite par PCR, ce qui permet de détecter sa présence à l'état hétérozygote, alors que le phénotype de résistance à l'herbicide ne s'observe qu'à l'état homozygote. Dans la parcelle, la fréquence variait de 15 à 28 % des graines testées, à une distance de 0.4 à 20 mètres autour de la parcelle, la fréquence parmi les graines de tournesols sauvages tombait

à 8%, et pour des distances allant de 50 à 60 m, elle n'était plus que de 0.2%. Ces effets spatiaux sont importants à courtes distances, mais peuvent néanmoins amener à considérer un espace plus large que la parcelle. La fréquence de transfert à 60 m est faible et se fait d'abord à l'état hétérozygote sur des individus n'exprimant pas le phénotype résistant qui ne pourra intervenir que dans des générations ultérieures lorsque le caractère apparaîtra à l'état homozygote. Moyennant quelques précautions agronomiques, ces disséminations du caractère dans l'environnement voisin de la parcelle restent contrôlables, par contre subsistent des interrogations sur des possibles transports de pollen à plus grandes distances par le vent ou les insectes, à des fréquences très faibles et donc difficilement mesurables. Des approches par modélisation peuvent alors être utiles pour en estimer les risques, avec néanmoins la limite de la capacité à tester la validité du modèle sur des données expérimentales, en général sur un paysage complexe où les sources de pollen diverses interfèrent.

La gestion spatiale des insectes et de leurs auxiliaires.

Parmi les bio-agresseurs du colza, les insectes tiennent une large place. Il s'agit principalement de coléoptères, adultes ou sous forme de larves. La moitié des applications de produits phytosanitaires sur colza sont des insecticides. Aujourd'hui, le contrôle de ces insectes est rendu plus difficile pour plusieurs raisons. La première est l'apparition de phénomènes de résistance des insectes aux insecticides de la famille des pyréthrinés, insecticides peu coûteux et très largement utilisés. Le phénomène a d'abord concerné les meligèthes au début des années 2000 et semble depuis progresser pour les altises et les charançons. La seconde est réglementaire, avec le retrait de familles chimiques anciennes comme les organochlorés et les organophosphorés, ou plus récentes comme les néonicotinoïdes. La recherche de solutions alternatives aux insecticides est difficile. La sélection de génotypes résistants nécessite de bien définir les caractères à prendre en compte qui sont nécessairement variés, d'ordre chimique, morphologique, écophysiologique. Il faut également disposer de méthodes de phénotypage directes ou indirectes performantes (signification, impacts, coûts, rapidité d'acquisition). Ceci renvoie à un développement des connaissances sur différents aspects de l'écologie des insectes. Ceux-ci sont des espèces mobiles qui ne passent qu'une partie de leur cycle sur une parcelle de colza. Les autres moments du cycle se déroulent souvent en milieux boisés ou non cultivés. Selon les espèces, les distances à considérer sont plus ou moins importantes. Par ailleurs, les populations d'insectes sont régulées par différents organismes, dont des insectes, eux-mêmes mobiles en dehors de la parcelle. La mise en place de stratégies de protection minimisant le recours aux insecticides nécessite là encore un approfondissement des connaissances sur l'écologie des insectes cibles et de leurs auxiliaires, y compris, et surtout, en dehors des parcelles de colza. Les aspects démographiques, et en particulier les phases de reproduction sont particulièrement importants à considérer, dans la mesure où ils déterminent les dynamiques de population qui se projettent sur les parcelles de colza à protéger. Les travaux les

plus avancés concernent les méligèthes. Les travaux de Rusch *et al.* (2011) ont permis de définir deux distances clef à prendre en compte au-delà de la parcelle : 250 et 1500 m, ainsi que différents éléments de paysage et/ou de pratiques intervenant à la fois sur les dynamiques de méligèthe et celles de ses principaux parasitoïdes, les genres *Tersylochus* et *Phradis*. Ces éléments ont permis de construire un modèle (Vinatier *et al.*, 2012) décrivant de façon connectée les dynamiques de population de Méligèthe, des parasitoïdes, le cycle de développement du colza, la structure du paysage et les pratiques agronomiques, avec en sortie une densité de méligèthes sur le paysage, associée à un taux de parasitisme. L'utilisation de MOSAIC-PEST a permis une première série de simulations testant des effets de paysage, de travail du sol, de rotations sur les dynamiques d'insectes.

Conclusion

Les exemples présentés ont pour point commun d'être travaillés avec un recours important à la modélisation. En quelques années, la modélisation est devenue l'outil indispensable aux agronomes, leur permettant de sortir de la seule échelle de la parcelle et des approches factorielles classiques qui, bien qu'utiles, montrent régulièrement leurs limites. Les modèles utilisés doivent être capables de décrire à la fois dans le temps et dans l'espace des phénomènes complexes, multifactoriels, avec une prise en compte suffisante des interactions. Pour un praticien, l'utilisation naturelle d'un modèle est de pouvoir expérimenter virtuellement par simulation des hypothèses, des scénarios de solutions potentielles. Les modèles construits, pour qu'ils soient effectivement utiles, ne doivent pas être qu'entre les mains des chercheurs qui les ont conçus, mais doivent pouvoir être utilisés par des agronomes de terrain. Pour arriver à un tel résultat, le cahier des charges à atteindre est loin d'être facile. La nécessaire simplification de la réalité doit être poussée jusqu'à un niveau suffisant pour permettre l'utilisation de l'outil par un non spécialiste, tout en la restituant sans la caricaturer à l'excès. Cet équilibre à trouver est important, et peut être travaillé au niveau de la conception du modèle ou au niveau de l'ergonomie des développements informatiques associés.

Un deuxième point doit être souligné. Les exemples présentés portent sur un caractère de qualité, ou un bioagresseur particulier. Cependant dans la pratique, un couvert, par exemple de colza, doit à la fois permettre de produire une qualité donnée, tout en subissant la présence, non pas d'un unique, mais de plusieurs bioagresseurs. Il faut donc aller vers des modèles multi-caractères et multi-bioagresseurs, forcément à la fois plus complexes et plus simplificateurs de la réalité. Ce dernier point venant donc renforcer encore la remarque précédente sur la nécessaire gestion d'un paradoxe : décrire simplement et avec pertinence une réalité complexe.

Bibliographie

Aubertot, J.N., Pinochet, X., Doré, T. 2004. The effects of sowing date and nitrogen availability during vegetative stages on Phoma stem canker (*Leptosphaeria maculans*) development on two winter oilseed rape cultivars. *Crop Protection* Vol 23/7: 635-645.

Balesdent, M.H., Louvard, K., Pinochet, X., Rouxel, T., 2006. A large-scale survey of races of *Leptosphaeria maculans* occurring on oilseed rape in France. *Eur J.Plant Pathol* 114:53-65.

Colbach N. 2011 Evaluation of prospective cropping system scenarios for managing oilseed rape volunteers and harvest purity using the GENESYS model. Congrès GCIRC Prague 2011.

Fargue, A., 2003. Maîtrise des flux de gènes chez le colza: Etude ex-ante de l'impact de différentes innovations variétales (Doctoral dissertation, INAPG (AgroParisTech)).

Hossard, L., 2012. Conception participative et évaluation numérique de scénarios spatialisés de systèmes de culture. Cas de la gestion du phoma du colza et de la durabilité des résistances (Doctoral dissertation, AgroParisTech).

Hossard, L., Jeuffroy, M.H., Pelzer, E., Pinochet, X., Souchere, V., 2013 a,. A participatory approach to design spatial scenarios of cropping systems and assess their effects on phoma stem canker management at a regional scale. *Soumis à Environmental Modelling and Software*. 48: 17-26.

Klein, E. K., Lavigne, C., Picault, H., Renard, M., & GOUYON, P. H., 2006. Pollen dispersal of oilseed rape: estimation of the dispersal function and effects of field dimension. *Journal of Applied Ecology*, 43(1), 141-151.

Lagravere, T., Kleiber, D., & Dayde, J., 1999. Conduites culturales et performances agronomiques du tournesol oléique: réalités et perspectives. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides*, 5(6), 477-85.

Merrien, A., Champolivier, L., Raimbault, J., Evrard, J., 1993 Tournesol oléique : premiers facteurs de variation de la composition. *Oléoscope-Bulletin du CETIOM* n°15 mai-juin 1993 p17-19.

Lô-Pelzer, E., 2008. Modélisation des effets des systèmes de culture et de leur répartition spatiale sur le phoma du colza et l'adaptation des populations pathogènes responsables de la maladie (*Leptosphaeria maculans*) aux résistances variétales (Doctoral dissertation, AgroParisTech).

Lô-Pelzer, E., Bousset, L., Jeuffroy, M.H., Salam, MU., Pinochet, X., Boillot, M., Aubertot, J.N., 2010. SIPPOM-WOSR: a Simulator for Integrated Pathogen POPulation Management of phoma stem canker on Winter OilSeed Rape. I. Description of the model. *Field crop research* vol 118: p 73-81.

Rouxel, T., Penaud, A., Pinochet, X., Brun, H., Gout, L., Delourme, R., Schmit, J., Balesdent, M.H., 2003. A ten Year survey of populations of *Leptosphaeria maculans* in France indicates a rapid adaptation towards the Rlm1 resistance gene of oilseed rape. *Eur J.Plant Pathol* 109: 871-881.

Rusch, A., Valantin-Morison, M., Sarthou, J. P., & Roger-Estrade, J., 2011. Multi-scale effects of landscape complexity and crop management on pollen beetle parasitism rate. *Landscape ecology*, 26(4), 473-486.

Sausse, C., Colbach, N., Young, M. W., & Squire, G. R., 2012. How to manage the impact of gene flow on oilseed rape

grain quality? Simulation case studies of three contrasted landscapes. *European Journal of Agronomy*, 38, 32-42.

Vinatier, F., Gosme, M., & Valantin-Morison, M., 2012. A tool for testing integrated pest management strategies on a tritrophic system involving pollen beetle, its parasitoid and oilseed rape at the landscape scale. *Landscape ecology*, 27(10), 1421-1433.

Associer des variétés pour maîtriser les maladies et stabiliser la production

Mixing cultivars to control diseases and stabilize crop production

Tiphaine VIDAL^{abe} - Christophe GIGOT^{abce}
Makram BELHAJ FRAJ^d - Marc LECONTE^e
Laurent HUBER^{ab} - Sébastien SAINT-JEAN^{ba}
Claude DE VALLAVIEILLE-POPE^e

^aINRA - UMR1402 EcoSys "Écologie Fonctionnelle et Écotoxicologie des Agroécosystèmes" - Route de la Ferme 78850 Thiverval-Grignon - France

^bAgroParisTech - UMR EcoSys "Écologie Fonctionnelle et Écotoxicologie des Agroécosystèmes" - Avenue Lucien Brétignières - 78850 Thiverval-Grignon - France

^cAdresse actuelle: Quantitative Biology and Epidemiology Lab Plant Pathology Department - University of California - Davis CA 95616 - États-Unis

^dInternational Center for Biosaline Agriculture (ICBA) - Academic City - Al Ruwayah - PO Box 14660 - Dubai - United Arab Emirates

^eINRA-AgroParisTech - BIOGER-CPP - Avenue Lucien Brétignières 78850 Thiverval-Grignon - France

Résumé

L'association variétale - c'est-à-dire l'association de différentes variétés d'une même espèce simultanément au sein d'une parcelle agricole - offre la possibilité de diversifier les traits de résistance aux maladies fongiques et les caractéristiques agronomiques des plantes. Bien conçues, les associations variétales permettent ainsi de mieux maîtriser les maladies et de stabiliser la quantité et la qualité de la production. Les résultats expérimentaux montrent que l'efficacité réelle des associations dépend fortement de certains facteurs clés tels que les conditions climatiques, la pression de maladies et le mode de dispersion des maladies. L'utilisation conjointe des expérimentations au champ et de la modélisation permet d'appréhender leur fonctionnement, et notamment les détails des mécanismes impliqués. L'optimisation de la conception des associations (nombre de variétés, choix des variétés selon leurs gènes de résistance majeurs et quantitatifs et d'autres traits, proportions et agencement de ces variétés) doit tenir compte des attentes et de l'environnement de production.

Mots-clés

Association variétale, maîtrise des maladies, stabilité des rendements, conception des associations.

Abstract

Using cultivar mixture makes it possible to bring more diversity at the field scale regarding disease resistance and agronomic traits, without major modifications of the cropping systems. When correctly designed and managed, cultivar mixtures can improve disease control and stabilize production for both quantity (yield) and quality (e.g. protein content). Concerning disease control, experimental results show that the efficiency of cultivar mixtures depends on different factors such as climatic conditions, pathogen pressure and the type of dispersal gradient. Combining experimental and modeling approaches make it possible to better understand cultivar mixture functioning and mechanisms that are involved and therefore improve mixture design and optimization. A

special attention is also given to criteria that must be considered - such as the number, the characteristics, the proportions and the spatial organization of the cultivars - in order to design mixtures that will match users' expectations.

Key-words

Cultivar mixture, disease control, yield stability, mixture design.

Introduction

La gestion de la diversité génétique dans les systèmes cultivés permet de tamponner les effets des aléas environnementaux sur les cultures dus aux stress biotiques et abiotiques et aux hétérogénéités du sol de la parcelle (Wolfe et al., 2000). Cette approche est particulièrement pertinente dans le contexte actuel d'évolutions climatiques (Pautasso et al., 2012). Elle permet de combiner des caractéristiques intéressantes et complémentaires de plusieurs génotypes. L'introduction d'un certain niveau de diversité génétique dans les systèmes cultivés peut, sous certaines conditions, favoriser la stabilité de la quantité et de la qualité de la production et réduire la propagation des maladies (par ex. Huang et al., 2012). Cela pourrait donc aider à réduire la dépendance aux intrants, en particulier les fertilisants et produits phytosanitaires. À plus long terme, nous pouvons escompter que le recours à ce type de pratiques se traduise par un ralentissement de l'érosion de l'efficacité des moyens de lutte conventionnels tels que la sélection variétale et l'emploi de produits phytosanitaires (Finckh et Wolfe, 2006) qui a tendance à s'accélérer ces dernières années (de Vallavieille-Pope et al., 2012 ; Leroux et Walker, 2011).

Dans un système agricole, la diversification peut se concevoir à différentes échelles de temps et d'espace, de la succession des cultures sur une même parcelle à la culture simultanée de différentes variétés ou espèces à l'échelle du paysage (Papaix et al., 2011) ou de la parcelle (Pelzer et al., 2012). Nous nous limitons ici au cas des associations variétales dans la parcelle (de Vallavieille-Pope et al., 2006) qui présente généralement l'avantage de ne demander que peu de modifications du système agricole en place. Les associations variétales sont par ailleurs considérées comme relativement faciles à mettre en œuvre et à faire évoluer (Kerhornou, 2013).

Cependant, malgré le réel potentiel des associations de variétés, leur emploi est restreint par la modification de certaines pratiques nécessaires en particulier dans la préparation du semis, de diverses contraintes de valorisation par la meunerie et de réglementation pour l'inscription variétale et pour la vente de la récolte (Belhaj Fraj, 2003a). Les processus d'évaluation des associations variétales à l'inscription nécessitent d'une part la distinction botanique de chacun des composants et d'autre part l'évaluation du rendement et de la qualité de l'association.

Par ailleurs, des différences importantes de comportement des associations variétales, notamment de rendement, ont été constatées selon les espèces (ex. Kiaer et al., 2009), les années (ex. Li et al., 2012), ou les environnements considérés (ex. Dai et al., 2012 ; Okonya et Maass, 2014). Toutefois, une synthèse portant sur les résultats d'une vingtaine de travaux menés sur des associations variétales de blé et d'orge, avec des conduites diverses, montre que les rendements sont en

moyenne supérieurs de 2,7 % dans les associations par rapport à la moyenne des variétés cultivées seules, avec une différence de -30 % à +100 % selon les expérimentations (Kiær *et al.*, 2009). La récapitulation de 12 études portant sur des associations variétales pour diverses cultures et maladies montre que les réductions de l'intensité des maladies obtenues expérimentalement sont également variables (Tableau 1).

La performance d'une association est fortement conditionnée par une conception adaptée, avec un choix de variétés

complémentaires, dans des proportions adaptées et tenant compte des contraintes environnementales. Les mécanismes mis en jeu dans les associations variétales ainsi que les règles de conception favorisant une bonne performance des associations sont aujourd'hui relativement bien connus. Ils sont présentés ci-dessous ainsi qu'un état des lieux des connaissances sur les associations variétales de diverses espèces s'appuyant sur des résultats expérimentaux récents et de nouvelles approches de modélisation.

Hôte	Maladie (Pathogène)	Type de dispersion	Variable étudiée	Réduction de la maladie	Référence
Blé tendre	Septoriose (<i>Zymoseptoria tritici</i>)	Éolienne / pluviale	Sévérité	22 % (3-35 %)	Gigot <i>et al.</i> (2013a)
Blé tendre	Septoriose (<i>Zymoseptoria tritici</i>)	Éolienne / pluviale	Sévérité	-23 % (-156 % à +40 %)	Cowger et Mundt, (2002)
Blé d'hiver	Septoriose (<i>Zymoseptoria tritici</i>)	Éolienne / pluviale	Surface foliaire malade	29 % (26-33 %)	Mille <i>et al.</i> (2006)
Pommier	Tavelure (<i>Venturia inaequalis</i>)	Pluviale	Sévérité	42% (33-60 %)	Parisi <i>et al.</i> (2013)
Blé tendre	Rouille brune (<i>Puccinia triticina</i>)	Éolienne	Sévérité	20% (8-31 %)	Dai <i>et al.</i> (2012)
Orge	Oïdium (<i>Blumeria graminis</i>)	Éolienne	Infection	41% (18-77 %)	Newton et Guy (2011)
Blé	Rouille jaune (<i>Puccinia striiformis</i>)	Éolienne	Taux épidémique	9 % (-45 à +56 %)	Huang <i>et al.</i> (2011)
Riz	Pyriculariose (<i>Magnaporthe grisea</i>)	Éolienne	Sévérité	62 % (30-91 %)	Zhu <i>et al.</i> (2005)
Blé	Helminthosporiose du blé (<i>Pyrenophthora tritici-repentis</i>)	Éolienne	Sévérité	21 % (7-56 %)	Cox <i>et al.</i> (2004)
Orge	Oïdium (<i>Blumeria graminis</i>)	Éolienne	Sévérité	40 % (5-74 %)	Newton et al. (2002)
Blé tendre	Strie céphalosporienne (<i>Cephalosporium gramineum</i>)	Tellurique	Incidence	-19 % (-220 à +68 %)	Mundt (2002a)

Tableau 1 : Exemples de réduction de maladies obtenues par l'usage d'associations de variétés.

Mécanismes mis en jeu

Nous avons identifié précédemment deux bénéfices majeurs des associations variétales : la stabilisation de la production et la maîtrise des maladies. S'ils sont présentés ici séparément, ces deux aspects sont liés puisque la maîtrise des maladies, bénéfice très souvent recherché dans les associations variétales, contribue fortement à la stabilité de la production (y compris qualitative).

Stabilisation de la production

Il ressort de nombreuses études que les associations variétales stabilisent quasiment systématiquement les performances des cultures par rapport à leurs composants en culture monovariétale (Lee *et al.*, 2006 ; Mille *et al.*, 2006 ; Kiær *et al.*, 2009 ; Mengistu *et al.*, 2010 ; Vlachostergios *et al.*, 2011 ; Okonya et Maass, 2014 ; Zhou *et al.*, 2014). Les associations variétales se caractérisent par une capacité d'adapta-

tion face à un environnement variable en fonction des années, des lieux et des pressions de maladies qui serait d'autant plus marquée que les variétés associées ont des caractéristiques agronomiques proches, mais des réponses aux stress environnementaux contrastées (Yachi et Loreau, 1999). Par exemple, il a été montré que des associations de variétés de blé d'hiver pouvaient permettre de mieux gérer les stress hydriques (Fang *et al.*, 2014). Belhaj Fraj (2003a) a également mis en évidence que l'impact d'un stress hydrique sur le rendement de grandes parcelles de blé est plus faible dans une association variétale que pour la moyenne des variétés cultivées en peuplement monovariétal.

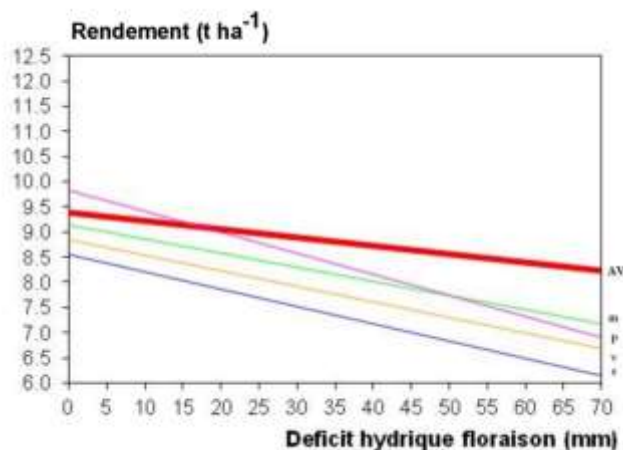


Figure 1 - Relations entre le rendement (t/ha) et déficit hydrique pendant la floraison (mm) dans un réseau de 18 parcelles agricoles au nord de la France. Les pentes des courbes sont calculées à l'aide d'un modèle de régression factorielle utilisant le déficit hydrique comme covariable environnementale caractéristique de chaque parcelle agricole (AV, association variétale; m, cv. Malacca; S, cv. Somme; P, cv. Apache et V, cv. Virtuose) (adapté de Belhaj Fraj, 2013a)

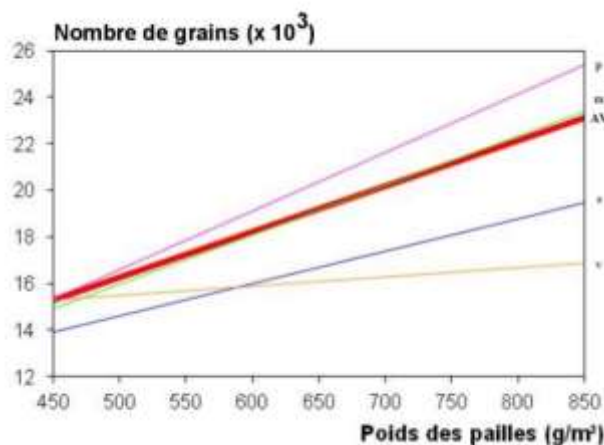


Figure 2 - Relation entre le nombre de grains par mètre carré ($\times 10^3$) et le poids des pailles (g/m^2) dans un réseau de 18 parcelles agricoles au nord de la France. Les pentes des courbes sont calculées à l'aide d'un modèle de régression factorielle utilisant le poids des pailles du cultivar Malacca révélateur des conditions du milieu comme covariable environnementale caractéristique de chaque parcelle agricole. Cette relation renseigne sur l'existence de stress pollinique et de fécondation corollaire avec la disponibilité des assimilats pour la remobilisation des parties végétatives vers les épis (AV, association variétale; m, cv. Malacca; S, cv. Somme; P, cv. Apache et V, cv. Virtuose) (adapté de Belhaj Fraj, 2013a)

Deux mécanismes majeurs peuvent permettre d'expliquer la stabilité constatée dans des associations : la complémentarité et la compensation entre variétés. La complémentarité pourrait permettre une meilleure utilisation des ressources, par exemple du fait de zones d'exploration racinaire légèrement différentes ou d'architectures aériennes différentes comme cela est largement démontré dans le cas en associations interspécifiques (Li et al., 2005). La compensation contribue à ce que des performances dégradées d'une variété suite à un stress soient compensées par le meilleur développement d'une autre variété moins sensible à ce stress. Au sein de l'association, la réponse différente des variétés aux stress peut être liée à un positionnement du cycle cultural différent vis-à-vis de la période de stress. L'importance rela-

tive de ces mécanismes a été étudiée chez *Arabidopsis thaliana* ; la stabilité offerte par les associations de variétés reposerait davantage sur des interactions compensatrices que sur la complémentarité entre les composants (Creissen et al., 2013). Les effets de compensation sont d'autant plus visibles que les niveaux de stress abiotiques dus à une température élevée et une carence nutritionnelle sont prononcés.

Ces effets de compensation sont fortement marqués dans le cas des céréales notamment grâce à leur aptitude au tallage. Par exemple pour le blé, le nombre d'épis du peuplement reste comparable pour des densités de semis différentes (Baccar, 2011). La contribution de chaque variété dans une association à la production totale de grains varie donc non seulement en fonction de la densité de semis de chaque variété mais aussi du développement de chacune d'entre elles. Quatre variétés de blé associées en proportions égales au semis (c'est-à-dire 25 % de chacune) peuvent présenter des variations de proportions de grains à la récolte s'échelonnant entre 15 et 37 % selon les variétés et les associations (Belhaj Fraj et al., 2003b). Par ailleurs, Finckh et Mundt (1992) ont observé des différences entre les proportions de variétés de blé associées de 0 à 35 % entre le semis et la récolte. Dans le cas d'une espèce végétale ligneuse, le peuplier, la capacité des plants à coloniser les espaces vacants laissés par des plants morts est un critère important pour la réussite des associations de variétés (McCracken et al., 2011).

Maîtrise des maladies

Un des principaux atouts des associations variétales est de permettre d'associer rapidement et facilement des facteurs de résistance complémentaires au sein d'une même parcelle en protégeant des variétés d'intérêt, sensibles à une maladie, par des plantes plus résistantes. On peut associer différents facteurs de résistance à une même maladie pour mieux gérer une maladie donnée, mais aussi des résistances à plusieurs maladies pour gérer simultanément plusieurs maladies au sein du peuplement. Par exemple, des lignées de blé sensibles à une souche locale de rouille jaune ont récemment montré une résistance partielle à une nouvelle souche de *Puccinia striiformis* présente en Europe depuis 2011, et réciproquement, la résistance de lignées partiellement résistantes vis-à-vis des anciennes souches a été contournée par la souche invasive (Sørensen et al., 2014). L'utilisation conjointe de divers facteurs de résistance, grâce aux associations variétales est d'autant plus pertinente pour contrer rapidement l'émergence d'une nouvelle souche du pathogène.

La réduction de l'intensité de maladie dans les associations variétales repose sur plusieurs mécanismes importants. Les principaux sont les effets de dilution des plantes sensibles (Fig. 3), de barrière à la dispersion des spores (Fig. 3), et de l'induction de résistance par des souches non virulentes qui protège contre les souches virulentes (Calonnec et al., 1996).

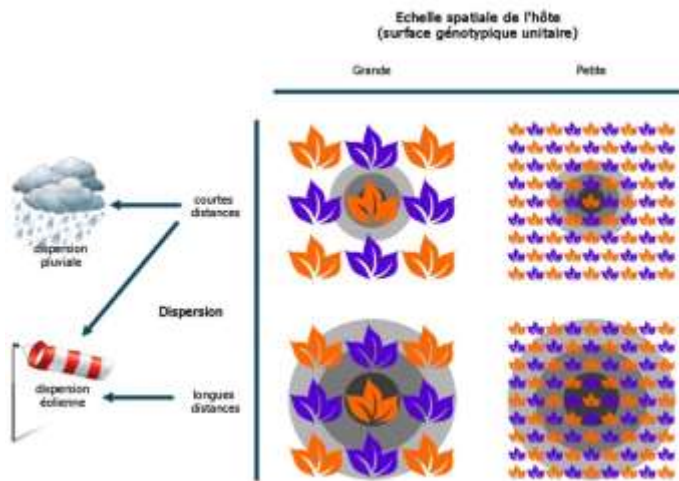


Figure 3 - Mécanismes impliqués dans la réduction des maladies en associations variétales

D'autres mécanismes, tels que la diversité accrue de la population pathogène, les interactions entre races de pathogènes (Lannou, 2001), ou encore la modification du microclimat par une meilleure circulation de l'air dans une association de variétés de riz (Zhu *et al.*, 2005) peuvent également contribuer à la réduction du niveau de maladie dans les associations variétales (Finckh et Wolfe, 2006).

Par ailleurs, les caractéristiques du pathosystème modulent l'efficacité des associations variétales vis-à-vis des maladies (Garrett et Mundt, 1999). Quelques facteurs clés sont présentés ici : le nombre de générations du pathogène au cours du cycle cultural, la pression d'inoculum et le rapport d'échelles entre la taille de la plante hôte et la distance de dispersion du pathogène.

L'utilisation d'associations variétales est pertinente dans le cas de maladies polycycliques, pour lesquelles on observe plusieurs générations de pathogènes au cours d'un cycle cultural. En effet, à chaque génération, une partie du nouvel inoculum est intercepté par des plantes résistantes et cause beaucoup moins de maladie que s'il avait été intercepté par des plantes sensibles. Par rapport à la moyenne des cultures monovariétales, la réduction de l'impact de la maladie au sein de l'association a donc tendance à s'accroître au fur et à mesure des itérations des cycles épidémiques, au cours de la saison.

Le rôle de la pression d'inoculum est également souvent évoqué pour expliquer au moins en partie la variabilité des effets protecteurs des associations (Finckh *et al.*, 2000). Par exemple, Raboin *et al.* (2012) et Gigot *et al.* (2013a) ne constatent aucune réduction de maladie lors d'années à forte pression phytoparasitaire en l'absence de traitement fongicide. En revanche, lorsque la pression est plus faible, on constate une réduction de la sévérité de maladie (Fig. 4), ainsi qu'un meilleur rendement de la variété sensible en association par rapport à la monoculture de cette même variété.

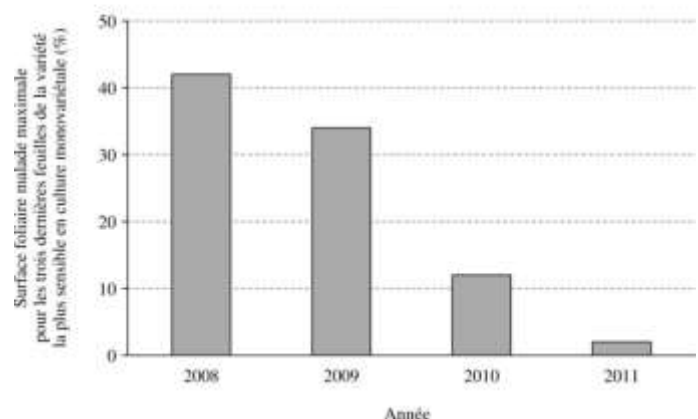
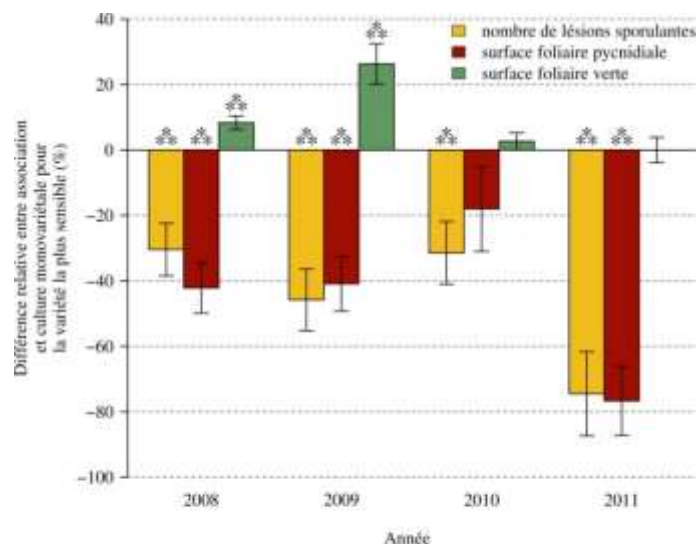


Figure 4 - Différences relatives des aires sous les courbes de progression pour le nombre de lésions sporulantes, la surface foliaire pycnidiale et la surface foliaire verte de la variété de blé sensible à la septoriose entre l'association variétale (1 plante sensible pour 3 résistantes) et la culture monovariétale, pour 4 années classées par ordre décroissant de pression de maladie au printemps. L'intensité de maladie de la variété sensible en culture monovariétale permet d'appréhender la pression de septoriose des différents printemps. Valeurs moyennes (\pm erreurs standards) des 3 dernières feuilles, avec 4 répétitions par modalité. Le seuil de significativité de chaque valeur est évalué par un test de Student (***) : seuil à 1 % (adapté de Gigot *et al.*, 2013)

La relation entre les distances caractéristiques des différents modes de dispersion et les surfaces occupées par les plantes sensibles est également un critère essentiel (Fig. 5). L'effet mélange est important lorsque l'échelle de dispersion permet aux plantes résistantes de jouer leur rôle de barrière. Une dispersion à courte distance comme par écla-boussissement (Huber *et al.*, 2006) sur un hôte de grande taille génère des niveaux élevés d'auto-infection qui a pour effet de réduire l'efficacité des associations variétales. C'est le cas de la maladie des taches noires des agrumes (Perryman *et al.*, 2014). La dispersion éolienne à grande distance augmente la probabilité de rencontrer une barrière génétique. Par ailleurs elle génère majoritairement un processus de progression de la maladie par foyer, plus facilement freiné par la présence de plantes voisines résistantes (Sapoukhina *et al.*, 2010). Ainsi, de nombreuses références montrent l'efficacité des associations variétales de céréales vis-à-vis de maladies à dispersion éolienne telles que les rouilles du blé et l'oïdium de l'orge (par ex. Wolfe, 1985 ; Mundt, 2002b).

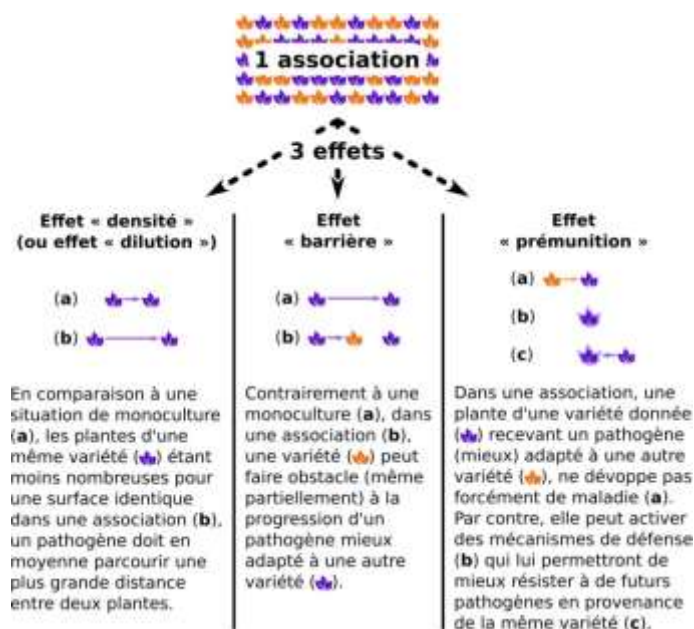


Figure 5 - Effet protecteur de l'association variétale en fonction du mode de dispersion du pathogène et de la taille de l'hôte (adapté de Garrett et Mundt, 1999)

Critères de constitution des associations variétales

L'efficacité des associations varie fortement en fonction de facteurs exposés précédemment. Ainsi, raisonner le choix variétal est déterminant pour la réussite de ce type de culture. Nous analysons les principaux critères devant être pris en compte ainsi que quelques éléments de réglementation.

Nombre de variétés

D'une manière générale, les bénéfices d'une association variétale augmentent avec le nombre de ses composants. En effet, plus le nombre de variétés est important, et plus la probabilité qu'au moins une des variétés s'adapte aux conditions de culture et aux différents stress est également élevée (Newton et al., 2008). L'absence d'un effet d'association de variétés de blé, parfois observé, pourrait être liée au nombre limité de composants associés, comme c'est le cas pour les associations de deux composants (Dai et al., 2012). Les associations de blé à trois variétés possèdent une plus grande plasticité face aux aléas environnementaux et un potentiel plus important pour l'amélioration de la qualité des farines que les associations de deux variétés (Zhou et al., 2014). Le rendement augmente linéairement avec le nombre de variétés d'orge associées, variant entre 2 et 10 variétés (Newton et al., 1997, 2008). Par ailleurs, un modèle de génétique des populations montre que la sévérité de maladies dues à des pathogènes spécialisés diminue si l'on augmente le nombre de composants de l'association (Mikaberidze et al., 2014). Dans le cas de cultures de peuplier, l'augmentation du nombre de composants au-delà de 10 variétés n'apporte pas de bénéfice évident (McCracken et al., 2011).

Toutefois, l'augmentation du nombre de composants au-delà de 6 variétés, est souvent difficile à mettre en œuvre (Newton et al., 2008), notamment du fait de difficile prévision des mécanismes de compensation et de complémentarité. Certaines variétés peuvent avoir un impact positif sur le rendement mais négatif sur certaines caractéristiques quali-

tatives de la récolte. Par ailleurs, des variétés qui ont des performances médiocres en monoculture peuvent donner de meilleurs résultats en association. Il est donc important de prendre en compte les caractéristiques individuelles de chaque variété, mais aussi les interactions entre variétés qui ont lieu au sein de l'association. Ceci peut être difficile à mettre en œuvre puisqu'un grand nombre de combinaisons de variétés est envisageable. Ainsi, une stratégie proposée est d'associer quatre variétés performantes dont la complémentarité a été établie au préalable dans des associations à deux variétés (Mille et al., 2006). Les performances d'associations de quatre variétés sont mieux prédites en partant des performances d'associations de deux variétés que de celles de cultures monovariétales.

Caractéristiques des variétés

Associer des variétés peut permettre d'obtenir des interactions positives de facilitation, ou négatives de compétition (Finckh et Mundt, 1992 ; Finckh et Wolfe, 2006). Des critères d'homogénéité agronomique par exemple pour la hauteur de tige, la précocité à la montaison, et la date de maturité sont habituellement préconisés pour limiter la compétition. Cette stratégie est notamment recommandée au Danemark pour les associations variétales d'orge de printemps et de blé tendre (Munk, 1997).

Associer des variétés très différentes peut cependant assurer une plus grande complémentarité et une meilleure exploitation des ressources. Par exemple, associer des variétés de blé ayant des complémentarités pour le potentiel de rendement et la qualité de grain est intéressant (Zhou et al., 2014). Des effets associations positifs peuvent être obtenus en associant des variétés phénotypiquement contrastées comme dans le cas de variétés d'orge présentant des différences de précocité et de hauteur significatives (Essah et Stoskopf, 2002). Cependant, associer des variétés très différentes met en jeu davantage de mécanismes que si les variétés sont plus proches. Ces mécanismes peuvent être négatifs ou positifs et sont souvent difficiles à prévoir. Cela complexifie donc le choix des variétés.

En ce qui concerne les maladies, différentes études par modélisation suggèrent que plus les variétés associées ont des différences de niveaux de résistance aux maladies contrastées, plus l'effet protecteur relatif de l'association est important (par ex. Gigot et al., 2014). Associer des variétés possédant différents gènes de résistance partielle à la rouille jaune du blé permet de limiter la proportion de plantes très résistantes à associer et diminue la pression de sélection sur le gène de résistance le plus efficace (Sapoukhina et al., 2013).

Des méthodes statistiques permettent de choisir les meilleures combinaisons de variétés en se basant sur les performances d'associations de deux variétés (Knott et Mundt, 1990 ; Lopez et Mundt, 2000 ; Vlachostergios et al., 2011). La meilleure combinaison de variétés d'une association quaternaire a été établie expérimentalement en testant 31 associations à deux composants (Mille et al., 2006). Une méthode plus rapide a été utilisée par Creissen et al. (2013) et a permis une bonne prédiction des capacités de compétition et des performances d'associations d'*Arabidopsis* à partir de traits phénotypiques aériens relativement facilement accessibles et mesurables. Des modèles peuvent également aider au

choix des combinaisons de variétés adaptées (ex: Gigot et al., 2014; Mikaberidze et al., 2014) et constituent des outils complémentaires intéressants pour aider à la conception d'associations de variétés.

Proportion des variétés

Il est généralement admis que l'intensité des maladies est fortement influencée par la proportion de plantes sensibles, une réduction de la proportion de tissus sensibles donnant presque automatiquement lieu à une réduction de la maladie (Garrett et Mundt, 1999 ; Cox et al., 2004 ; Dai et al., 2012). Il est donc important de trouver un juste équilibre entre différents objectifs des associations variétales. Ainsi, au cours de la saison culturale, l'objectif est de réduire la progression de la maladie, ce qui est assuré par l'emploi d'une proportion importante de plantes résistantes alors qu'au cours des années, l'objectif est de retarder l'érosion de gènes de résistance, ce qui implique de limiter l'utilisation de chaque gène de résistance en diversifiant les gènes de résistance des variétés cultivées.

Les proportions optimales des variétés dépendent des types de résistance (spécifique ou non-spécifique) et des niveaux de résistance (Jeger et al., 1981, Xu & Ridout, 2000, Gigot et al., 2014). Un effet association relatif, correspondant à la différence de sévérité de maladie entre une association de deux variétés et ses composantes cultivées seules, a été évalué par simulation (Gigot et al., 2014). L'effet association maximal est obtenu pour les associations comportant plus de 50 % de la variété la plus résistante (Gigot et al., 2014). Des simulations montrent également que l'association de deux variétés tend à sélectionner des pathogènes moins agressifs qu'en culture monovariétale quelle que soit la proportion des variétés (Marshall et al., 2009).

Les proportions des variétés peuvent également avoir un impact sur la qualité et/ou quantité de la production. Concrètement, il a été montré que les associations en différentes proportions d'une variété de blé à fort potentiel de rendement avec une autre à un fort potentiel de taux de protéine, ont un rendement et un taux de protéine qui varient linéairement en fonction de la proportion de chaque variété (Dai et al., 2012).

Agencement spatial des variétés

L'organisation spatiale des variétés d'une association, en particulier, la surface génotypique unitaire, qui correspond à la surface occupée par une ou plusieurs plantes adjacentes de la même variété, est considérée comme un facteur important de performance. L'effet association, notamment pour la réduction des maladies, est d'autant plus élevé que la surface unitaire occupée par variété est petite (Mundt et Browning, 1985). En simulant différents agencements variétaux, les réductions de sévérité de maladie dispersée par éclaboussement peuvent varier du simple au double (Gigot et al., 2014). En règle générale, l'agencement le plus pertinent est obtenu avec les plus petites surfaces génotypiques unitaires (Newton et Guy, 2009). En revanche, Raboin et al. (2012) n'ont pas relevé de différences significatives de niveau de pyriculariose entre variétés de riz associées aléatoirement ou en rangs.

Réglementation

La réglementation française repose sur la directive européenne 66/402/CEE modifiée en 1979 par l'article 13 qui admet que les semences d'une espèce de céréale soient commercialisées sous forme de mélanges déterminés de semences de différentes variétés si ceci présente un avantage contre la propagation d'organismes nuisibles et que, prises individuellement, les variétés du mélange répondent aux règles de commercialisation. Une décision récente (18 mars 2014) autorise une expérience temporaire pour la commercialisation de populations de blé, orge, avoine et maïs conformément à la directive 66/402/CEE du Conseil.

En pratique, il y a plusieurs possibilités pour constituer les associations. Les semences peuvent être préparées, en aval, par les agriculteurs en associant des variétés certifiées disponibles sur le marché ; en amont, une association peut être soumise à l'inscription au catalogue officiel avec les critères de distinction, homogénéité et stabilité évalués par variété composant l'association et une valeur agronomique, technologique et environnementale établie sur l'association.

Conclusion

Les associations variétales bien conçues peuvent permettre de mieux maîtriser les maladies et de stabiliser la qualité et la quantité de production. Les associations peuvent être utilisées en vue d'une simplification de la gestion de parcelles hétérogènes (par ex. en Normandie pour le blé fourrager, Gigot et al., 2013b). Cependant, si la conduite des associations variétales est relativement proche de celle d'une culture monovariétale, elle peut cependant impliquer l'acquisition d'équipements spécifiques, en particulier pour mélanger convenablement les graines juste avant le semis (Dai et al., 2012). De plus, la valorisation des récoltes des associations peut être limitante dans le cas de blé meunier. En effet, la filière est encore peu adaptée aux associations variétales qui compliquent le contrôle précis des propriétés technologiques et la traçabilité des grains demandés par certains débouchés.

Les associations variétales dont l'utilisation est encore réduite présentent une grande flexibilité, puisque l'on peut choisir les composants les plus adaptés et modifier la composition des associations d'une année sur l'autre. Des résultats de modélisation et d'expérimentations montrent qu'il est possible d'optimiser la conception d'associations variétales ce qui pourrait faciliter l'utilisation de cette pratique culturale et ouvrir la voie à de réelles réductions d'utilisation de produits phytosanitaires en particulier les fongicides. Dans un contexte prégnant de réduction des intrants, les associations variétales trouvent toute leur place d'autant plus que leurs bénéfices et intérêts sont d'autant plus importants dans des systèmes de culture en bas intrant (Mau-méné et al., 2013; Belhaj Fraj, 2003). La conception des associations doit être réalisée en fonction de l'environnement de production, de considérations agronomiques, mais aussi des contraintes et des besoins du système de production.

Remerciements

Ce travail a été financé par le Ministère de l'Agriculture (CTPS C-03-2010) et la Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité-LU ("Les Champs de Biodiversité"). Nous re-

mercions X. Pinochet et M.-H. Jeuffroy pour leurs commentaires.

Bibliographie

Baccar, R., 2011. Plasticité de l'architecture du blé d'hiver modulée par la densité et la date de semis et son effet sur les épidémies de *Septoria tritici*. Thèse de doctorat AgroParisTech, Paris

Belhaj Fraj, M., 2003a. Évaluation de la stabilité et de la faisabilité des associations variétales de blé tendre d'hiver à destination meunière en conditions agricoles : application aux conditions de culture du Nord de la France. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure Agronomique de Rennes

Belhaj Fraj, M., Falentin-Guyomarc'h, H., Monod, H., de Vallavieille-Pope, C., 2003b. The use of microsatellite markers to determine the relative proportions of grain produced by cultivars and the frequency of hybridization in bread wheat mixtures. *Plant Breed.* 122, 385-391

Calonnec, A., Goyeau, H., de Vallavieille-Pope, C., 1996. Effects of induced resistance on infection efficiency and sporulation of *Puccinia striiformis* on seedlings in varietal mixtures and on field epidemics in pure stands. *Eur. J. Plant Pathol.* 102, 733-741

Cowger, C., Mundt, C.C., 2002. Effects of wheat cultivar mixtures on epidemic progression of *Septoria tritici* blotch and pathogenicity of *Mycosphaerella graminicola*. *Phytopathology* 92, 617-623

Cox, C.M., Garrett, K.A., Bowden, R.L., Fritz, A.K., Dendy, S.P., Heer, W.F., 2004. Cultivar mixtures for the simultaneous management of multiple diseases: Tan spot and leaf rust of wheat. *Phytopathology* 94, 961-969

Creissen, H.E., Jorgensen, T.H., Brown, J.K.M., 2013. Stabilization of yield in plant genotype mixtures through compensation rather than complementation. *Ann. Bot.* 112, 1439-1447

Dai, J., Wiersma, J.J., Holen, D.L., 2012. Performance of hard red spring wheat cultivar mixtures. *Agron. J.* 104, 17.

Essah, S.Y., Stoskopf, N.C., 2002. Mixture performance of phenotypically contrasting barley cultivars. *Can. J. Plant Sci.* 82, 1-6

Fang, Y., Xu, B., Liu, L., Gu, Y., Liu, Q., Turner, N.C., Li, F.M., 2014. Does a mixture of old and modern winter wheat cultivars increase yield and water use efficiency in water-limited environments? *Field Crops Res.* 156, 12-21

Finckh, M.R., Gacek, E.S., Goyeau, H., Lannou, C., Merz, U., Mundt, C.C., Munk, L., Nadziak, J., Newton, A.C., de Vallavieille-Pope, C., Wolfe, M.S., 2000. Cereal variety and species mixtures in practice, with emphasis on disease resistance. *Agronomie* 20, 813-837

Finckh, M.R., Mundt, C.C., 1992. Plant competition and disease in genetically diverse wheat populations. *Oecologia* 91, 82-92

Finckh, M.R., Wolfe, M.S., 2006. Diversification strategies, in: COOKE, B.M., JONES, D.G., KAYE, B. (Eds.), *The Epidemiology of Plant Diseases*. Springer Netherlands, pp. 269-307

Garrett, K.A., Mundt, C.C., 1999. Epidemiology in mixed host populations. *Phytopathology* 89, 984-990

Gigot, C., Saint-Jean, S., Huber, L., Maumené, C., Leconte, M., Kerhornou, B., de Vallavieille-Pope, C., 2013a. Protective effects of a wheat cultivar mixture against splash-dispersed septoria tritici blotch epidemics. *Plant Pathol.* 62, 1011-1019

Gigot, C., de Vallavieille-Pope, C., Leconte, M., Saint-Jean, S., 2013b. Associations de blés tendres : Mélanger les variétés pour limiter les attaques de septoriose. *Perspectives Agricoles* 70-74

Gigot, C., Vallavieille-Pope, C. de, Huber, L., Saint-Jean, S., 2014. Using virtual 3-D plant architecture to assess fungal pathogen splash dispersal in heterogeneous canopies: a case study with cultivar mixtures and a non-specialized disease causal agent. *Ann Bot* 114, 863-876

Huang, C., Sun, Z., Wang, H., Luo, Y., Ma, Z., 2011. Spatio-temporal effects of cultivar mixtures on wheat stripe rust epidemics. *Eur. J. Plant Pathol.* 131, 483-496

Huang, C., Sun, Z., Wang, H., Luo, Y., Ma, Z., 2012. Effects of wheat cultivar mixtures on stripe rust: A meta-analysis on field trials. *Crop Prot.* 33, 52-58

Huber, L., Madden, L.V., Fitt, B.D.L., 2006. Environmental biophysics applied to the dispersal of fungal spores by rain-splash, in: Cooke, B.M., Gareth, D.G., Kaye, B. (Eds.), *The Epidemiology of Plant Diseases*. Springer, pp. 348-370

Jeger, M., Jones, D., Griffiths, E., 1981. Disease progress of non-specialized fungal pathogens in intraspecific mixed stands of cereal cultivars. 2. Field Experiments. *Ann. Appl. Biol.* 98, 199-210

Kerhornou, 2013. Simplifier les interventions tout en étalant les chantiers. *Perspectives Agricoles* 70-74

Kiær, L.P., Skovgaard, I.M., Østergård, H., 2009. Grain yield increase in cereal variety mixtures: A meta-analysis of field trials. *Field Crops Res.* 114, 361-373

Knott, E.A., Mundt, C.C., 1990. Mixing ability analysis of wheat cultivar mixtures under diseased and nondiseased conditions. *Theor. Appl. Genet.* 80, 313-320

Lannou, C., 2001. Intrapathotype diversity for aggressiveness and pathogen evolution in cultivar mixtures. *Phytopathology* 91, 500-510

Lee, K.-M., Shroyer, J.P., Herrman, T.J., Lingenfelser, J., 2006. Blending hard white wheat to improve grain yield and end-use performances. *Crop Sci.* 46, 1124

Leroux, P., Walker, A.-S., 2011. Multiple mechanisms account for resistance to sterol 14 alpha-demethylation inhibitors in field isolates of *Mycosphaerella graminicola*. *Pest Manag. Sci.* 67, 44-59

Li, L., Sun, J., Zhang, F., Guo, T., Bao, X., Smith, F.A., Smith, S.E., 2005. Root distribution and interactions between intercropped species. *Oecologia* 147, 280-290

- Li, N., Jia, S., Wang, X., Duan, X., Zhou, Y., Wang, Z., Lu, G., 2012. The effect of wheat mixtures on the powdery mildew disease and some yield components. *J. Integr. Agric.* 11, 611-620
- Lopez, C.G., Mundt, C.C., 2000. Using mixing ability analysis from two-way cultivar mixtures to predict the performance of cultivars in complex mixtures. *Field Crops Res.* 68, 121-132
- Maumené, C., Couleaud, G., du Cheyron, P., 2013. Associations de blés tendres, effet réduit mais réel sur les rendements et les fongicides. *Perspectives Agricoles* 76-79
- Marshall, B., Newton, A.C., Zhan, J., 2009. Quantitative evolution of aggressiveness of powdery mildew under two-cultivar barley mixtures. *Plant Pathol.* 58, 378-388
- McCracken, A.R., Walsh, L., Moore, P.J., Lynch, M., Cowan, P., Dawson, M., Watson, S., 2011. Yield of willow (*Salix* spp.) grown in short rotation coppice mixtures in a long-term trial. *Ann. Appl. Biol.* 159, 229-243
- Mengistu, N., Baenziger, P.S., Nelson, L.A., Eskridge, K.M., Klein, R.N., Baltensperger, D.D., Elmore, R.W., 2010. Grain yield performance and stability of cultivar blends vs. component cultivars of hard winter wheat in Nebraska. *Crop Sci.* 50, 617-623
- Mikaberidze, A., McDonald, B., Bonhoeffer, S., 2014. How to develop smarter host mixtures to control plant disease? 32P
- Mille, B., Belhaj Fraj, M., Monod, H., de Vallavieille-Pope, C., 2006. Assessing four-way mixtures of winter wheat cultivars from the performances of their two-way and individual components. *Eur. J. Plant Pathol.* 114, 163-173
- Mundt, C.C., 2002a. Performance of wheat cultivars and cultivar mixtures in the presence of *Cephalosporium* stripe. *Crop Prot.* 21, 93-99
- Mundt, C.C., 2002b. Use of multiline cultivars and cultivar mixtures for disease management. *Annu. Rev. Phytopathol.* 40, 381-410
- Mundt, C.C., Browning, J.A., 1985. Development of crown rust epidemics in genetically diverse oat populations: effect of genotype unit area. *Phytopathology* 75, 607-610
- Munk, L. 1997. Variety mixtures: 19 years of experience in Denmark. In: *Variety Mixtures in theory and practice*, Wolfe, M. S., ed. European Union Variety and Species Mixtures working group of COST Action 817. Online at: <http://www.scri.ac.uk/research/pp/pestanddisease/rhynchosporiumonbarley/otherwork/cropmixtures/varietymixtures>
- Newton, A.C., Ellis, R.P., Hackett, C.A., Guy, D.C., 1997. The effect of component number on *Rhynchosporium secalis* infection and yield in mixtures of winter barley cultivars. *Plant Pathol.* 46, 930-938
- Newton, A.C., Guy, D.C., 2009. The effects of uneven, patchy cultivar mixtures on disease control and yield in winter barley. *Field Crops Res.* 110, 225-228
- Newton, A.C., Guy, D.C., 2011. Scale and spatial structure effects on the outcome of barley cultivar mixture trials for disease control. *Field Crops Res.* 123, 74-79
- Newton, A.C., Guy, D.C., Nadziak, J., Gacek, E.S., 2002. The effect of inoculum pressure, germplasm selection and environment on spring barley cultivar mixtures efficacy. *Euphytica* 125, 325-335
- Newton, A.C., Hackett, C.A., Swanston, J.S., 2008. Analysing the contribution of component cultivars and cultivar combinations to malting quality, yield and disease in complex mixtures. *J. Sci. Food Agric.* 88, 2142-2152
- Okonya, J.S., Maass, B.L., 2014. Potential of cowpea variety mixtures to increase yield stability in subsistence agriculture: Preliminary results. *Int. J. Agron.* 2014. Article ID 515629, 7 pages
- Papaix, J., Goyeau, H., du Cheyron, P., Monod, H., Lannou, C., 2011. Influence of cultivated landscape composition on variety resistance: an assessment based on wheat leaf rust epidemics. *New Phytol.*, 191, 1095-1107
- Parisi, L., Gros, C., Combe, F., Parveaud, C.-E., Gomez, C., Brun, L., 2013. Impact of a cultivar mixture on scab, powdery mildew and rosy aphid in an organic apple orchard. *Crop Prot.* 43, 207-212
- Pautasso, M., Döring, T., Garbelotto, M., Pellis, L., Jeger, M., 2012. Impacts of climate change on plant diseases—opinions and trends. *Eur. J. Plant Pathol.* 133, 295-313
- Pelzer, E., Bazot, M., Makowski, D., Corre-Hellou, G., Naudin, C., Al Rifaï, M., Baranger, E., Bedoussac, L., Biarnès, V., Boucheny, P., 2012. Pea–wheat intercrops in low-input conditions combine high economic performances and low environmental impacts. *Eur. J. Agron.* 40, 39-53
- Perryman, S. a. M., Clark, S.J., West, J.S., 2014. Splash dispersal of *Phyllosticta citricarpa* conidia from infected citrus fruit. *Sci. Rep.* 4
- Raboin, L.M., Ramanantsoanirina, A., Dusserre, J., Razasolonahary, F., Tharreau, D., Lannou, C., Sester, M., 2012. Two-component cultivar mixtures reduce rice blast epidemics in an upland agrosystem: Cultivar mixtures and blast in upland rice. *Plant Pathol.* 61, 1103-1111
- Sapoukhina, N., Tyutyunov, Y., Sache, I., Arditi, R., 2010. Spatially mixed crops to control the stratified dispersal of airborne fungal diseases. *Ecol. Model.* 221, 2793-2800. doi
- Sapoukhina, N., Paillard, S., Dedryver, F., de Vallavieille-Pope, C., 2013. Quantitative plant resistance in cultivar mixtures: wheat yellow rust as a modeling case study. *New Phytol.*, 200 (3) 888-897
- Sørensen, C., Hovmøller, M., Leconte, M., Dedryver, F., de Vallavieille-Pope, C., 2014. New races of *Puccinia striiformis* found in Europe reveal race-specificity of long-term effective adult plant resistance in wheat. *Phytopathology*, 104 (10) 1042-1051
- de Vallavieille-Pope, C., Ali, S., Leconte, M., Enjalbert, J., Delos, M., Rouzet, J., 2012. Virulence dynamics and regional structuring of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* in France between 1984 and 2009. *Plant Dis.* 96, 131-140
- de Vallavieille-Pope, C., Belhaj Fraj, M., Mille, B., Meynard, J.-M., 2006. Les associations de variétés: accroître la biodiversité

sité pour mieux maîtriser les maladies. Doss. de l'environnement de l'INRA 30, 101-109

Vlachostergios, D.N., Lithourgidis, A.S., Dordas, C.A., Baxevanos, D., 2011. Advantages of mixing common vetch cultivars developed from conventional breeding programs when grown under low-input farming system. Crop Sci. 51, 1274-1281

Wolfe, M.S., 1985. The current status and prospects of multi-line cultivars and variety mixtures for disease resistance. Annu. Rev. Phytopathol. 23, 251-273

Wolfe, M.S., 2000. Crop strength through diversity. Nature 406, 681-682

Xu, X.M., Ridout, M.S., 2000. Stochastic simulation of the spread of race-specific and race-nonspecific aerial fungal pathogens in cultivar mixtures. Plant Pathol. 49, 207-218

Yachi, S., Loreau, M., 1999. Biodiversity and ecosystem productivity in a fluctuating environment: The insurance hypothesis. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 96, 1463-1468

Zhou, K.Q., Wang, G.D., Li, Y.H., Liu, X.B., Herbert, S.J., Hashemi, M., 2014. Assessing variety mixture of continuous spring wheat (*Triticum aestivum* L.) on grain yield and flour quality in Northeast China. Int. J. Plant Prod. 8, 91-105

Zhu, Y.-Y., Fang, H., Wang, Y.-Y., Fan, J.X., Yang, S.-S., Mew, T.W., Mundt, C.C., 2005. Panicle blast and canopy moisture in rice cultivar mixtures. Phytopathology 95, 433-438.

Le mélange de variétés en blé : une pratique devenant plus fréquente

Émilie Denis*

* Fédération Départementale des CIVAM de la Sarthe (72)

Le groupe « grandes cultures économes » du CIVAM AD 72 (Sarthe) s'est développé autour du concept de diversité. Il rassemble des exploitations de la Sarthe et de la Mayenne ayant des orientations diverses (céréales, volailles, porcs, bovins lait, bovins viande) et des modes de production variés (agriculture intégrée, agriculture de conservation, agriculture biologique). Malgré cette diversité de contextes, ces agriculteurs ont adopté une technique agronomique commune : les mélanges de variétés.

Quels sont les intérêts d'un mélange de variétés en blé tendre ?

Le principal intérêt est de **limiter la propagation des maladies fongiques dans le peuplement**. Pour évaluer *a priori* la résistance de son mélange aux maladies, Sébastien Paineau, agriculteur dans l'Est de la Sarthe, utilise le diagramme ci-dessous en partant des données annuellement fournies par Arvalis : « Il est composé de 6 variétés (Apache, Arezzo, Atlass, Mendel, Mercato, Oratorio). Il pêche néanmoins pour le piétin verse mais, vu mes rotations ne comportant pas de blé sur blé et mes sols, j'ai peu de problème avec ce champignon ».

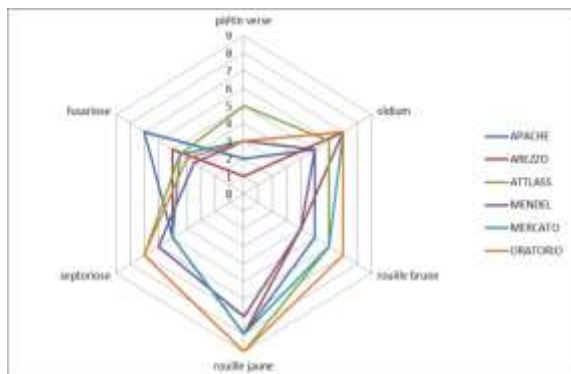


Figure 1 - Exemple de représentation de l'analyse des résistances des variétés aux maladies

Les mélanges variétaux permettent également de **réduire les risques liés à la variabilité climatique interannuelle**,

chaque variété ayant des caractéristiques assez différentes en matière de tolérance aux stress hydriques, aux excès d'eau, à l'échaudage, à la germination sur pied, etc... Les membres du groupe CIVAM estiment, pour une année donnée, qu'un mélange bien conçu n'atteindra pas forcément le meilleur rendement de la zone mais il permettra de réduire les risques d'accidents climatiques ou de maladies assez fréquents lorsque l'on n'emblave qu'une seule variété par parcelle. En effet, choisir une variété X pour une parcelle Y suppose que l'on soit capable de prévoir les états du milieu pendant l'année de culture, ce qui est évidemment impossible vu la variabilité climatique interannuelle.

Autre avantage, cultiver le même mélange dans toutes ses parcelles facilite **l'organisation du travail**. Un des agriculteurs du groupe mentionne : « Une fois réalisé le choix des variétés à semer en mélange, l'on ne se casse plus la tête à savoir quelle variété semer dans quelle parcelle, on sème le même mélange partout ! ». Une difficulté doit cependant être signalée : le nombre très réduit de variétés tolérantes à la fusariose des épis, ce qui limite les possibilités de composer un mélange pertinent en cas de semis de blé tendre après maïs (espèce comportant beaucoup de variétés sensibles à ce même type de fusariose).

Pour certains membres du groupe qui produisent des semences fermières, l'autoproduction des semences des variétés composant le mélange permet de cultiver des blés qui s'adaptent progressivement à leur terroir (il est cependant important de limiter le risque carie (*Tilletia caries* ou *Tilletia foetida*), ce qui suppose des désinfections des semences).

Comment élaborer un mélange variétal ?

« Pour un effet barrière efficace contre les maladies, il faut au minimum trois variétés », mentionne Sébastien Lallier, agriculteur et conseiller indépendant en grandes cultures. Dans le groupe du CIVAM AD 72, les mélanges comprennent entre trois et six variétés, de préférence des variétés assez rustiques qui associent diverses tolérances à plusieurs maladies fongiques et une productivité élevée, et qui se comportent assez bien en itinéraire technique à bas intrants.

Après avoir pratiqué ces mélanges pendant plusieurs années (plus de 20 ans pour certains d'entre eux), les membres du CIVAM privilégient les critères suivants au moment de constituer le mélange : (1) la complémentarité des résistances aux maladies, (2) des précocités à maturité assez voisines (pour une maturité homogène au moment du battage) ; (3) des hauteurs d'épiaison assez proches (pour ne pas faire trop d'ombre aux variétés plus petites) ; (4) des caractéristiques de battage assez voisines (pour faciliter les réglages des batteurs des moissonneuses) ; (5) une qualité boulangère appréciée par la meunerie s'il s'agit de blés qui seront commercialisés (ce qui n'est le cas que d'une partie des membres du groupe CIVAM).

Certains agriculteurs du groupe ont poussé la réflexion jusqu'à mélanger des variétés barbeuses (telles que Arezzo ou Mercato) avec des variétés sans barbe, et ce afin de ralentir les attaques de pucerons.

Comment procéder au mélange variétal ?

On distingue plusieurs écoles. La première solution consiste à semer dans la même parcelle des bandes de variétés « en

pure » que la moissonneuse-batteuse croîsera au moment de la récolte.

Une seconde solution consiste à récolter individuellement chaque bande avec stockage séparé de chaque variété grâce à des big-bag. Le mélange sera réalisé quelques semaines après grâce à l'utilisation de deux remorques et d'une vis en prenant en compte les résultats de ces variétés dans la région et les observations réalisées par variété lors de la campagne.

La troisième solution consiste à semer une superficie donnée (par exemple, un hectare si on emblave chaque année une cinquantaine d'ha de blé tendre) de semences de variétés préalablement mélangées (à la bétonnière par exemple) dans une parcelle favorable (peu d'adventices, rotations bien respectées).

Et pour le renouvellement des variétés du mélange, certains font des échanges avec leurs voisins. D'autres renouvellent leur mélange en incorporant chaque année une ou deux nouvelles variétés jugées prometteuses des obtenteurs. L'offre variétale, abondante en blé tendre, favorise ces évolutions des mélanges.

Dans le groupe CIVAM AD 72, le mélange de variétés en blé tendre apparaît aujourd'hui comme une évidence et il est également mis en œuvre pour d'autres cultures (orge, colza, pois et parfois maïs ...).

Impact de la diffusion d'une variété améliorée de sorgho au Mali : interaction avec les variétés locales

Dissemination impact of a sorghum improved variety in Mali: interaction with landraces

Mamoutou KOURESSY* - **Salifou SISSOKO***
Niaba TÉMÉ* - **Monique DEU****
Michel VAKSMANN** - **Yanfilé CAMARA*****
Didier BAZILE**** - **Aichata F.M. SAKO******
Amadou SIDIBÉ*

*Institut d'Economie Rural (IER) - P.O. Box 262 - Bamako

Mali

Courriels : nany63@gmail.com - niabateme@gmail.com - amadousidibe57@yahoo.fr

**CIRAD - UMR AGAP- TA A-108 / 03 - Avenue Agropolis - 34398 Montpellier Cedex 5 - France

Courriels : michel.vaksmann@cirad.fr - monique.deu@cirad.fr

***Faculté des Sciences et Techniques de l'Université de Bamako

**** CIRAD, UPR GREEN, F-34398 Montpellier, France

Courriel : didier.bazile@cirad.fr

*****University of Paris 8 Vincennes-Saint-Denis - Department of Geography - EDSS - Saint-Denis, France

Courriel : a.sako@cgiaf.org

Résumé

Au Sahel, les agriculteurs pratiquent la sélection massale en produisant leurs semences de sorgho dans les champs de culture. Dans un tel agroécosystème, du fait de l'allogamie partielle du sorgho, les variétés peuvent s'intercroiser naturellement entre elles. Dans la zone soudano-sahélienne du Mali, on note la diffusion récente d'une variété améliorée « *Jakumbé* », peu photopériodique, de morphologie proche des variétés locales mais nettement plus précoce. Le taux de diffusion de *Jakumbé* est très imprécis allant, selon les études, de 20 à 90%. L'objectif de ce travail qui combine des résultats d'enquête et des caractérisations phénologiques est d'estimer la diffusion réelle de *Jakumbé* dans deux villages et les conséquences de cette adoption sur le devenir des variétés traditionnelles.

Comme *Jakumbé* est plus précoce que les variétés locales photopériodiques, la durée du cycle est utilisée pour distinguer les différents cultivars. Les variétés cultivées dans deux villages de la région de Ségou au Mali, Bouawéré et Kagnan, ont été étudiées en 2009 et 2010, quelques années après la vulgarisation de *Jakumbé*. En 2009, les variétés provenant de 29 champs du village de Bouawéré ont été étudiées avec une date de semis précoce le 8 juin. En 2010, les variétés provenant de 19 champs du village de Kagnan ont été étudiées avec deux dates de semis le 18 juin et le 19 juillet.

Les résultats montrent qu'une faible proportion des champs peut être considérée comme composée uniquement de *Jakumbé* (11 % à Bouawéré comme à Kagnan). La plupart des champs présente une distribution bimodale de la précocité qui identifie un mélange entre les variétés locales et *Jakumbé* (71% à Bouawéré et

47 % à Kagnan). Le reste des champs porte des variétés locales uniformément plus tardives que *Jakumbé* (18 % à Bouawéré et 42 % à Kagnan).

Comme la morphologie de *Jakumbé* est proche de celle des variétés locales, les paysans ne sont pas capables d'identifier la pré-

sence de mélanges. Sans le savoir, les paysans cultivent donc majoritairement un mélange de variétés traditionnelles et de *Jakumbé* plus précoce. Cette diffusion rapide de *Jakumbé* montre l'intérêt des paysans pour les nouvelles variétés précoces proposées par la recherche. Toutefois, la culture de mélanges de variétés pourrait avoir un impact négatif en contribuant au développement de la Cécidomyie (*Stenodiplosis sorghicola*), un important ravageur du sorgho en Afrique sub-saharienne mais encore peu présent au Mali.

Mots-clés

Sorgho, Mali, photopériodisme, diversité génétique.

Abstract

In the Sahel, farmers practice mass selection by producing their own sorghum seeds in crop fields. In such agro ecosystem, due to the partial sorghum outcrossing, intercrossing may occur between varieties. In the Sudano-Saharan zone of Mali, we note the recent release of an improved variety "*Jakumbé*", having morphological similarities with local varieties but much earlier-maturing. The diffusion rate of *Jakumbé* is very imprecise, according to studies, 20 to 90%. The objective of this work is to estimate the true distribution of *Jakumbé* in two villages and the future consequences of this introduction on the traditional varieties.

As *Jakumbé* is earlier-maturing than photoperiod-sensitive landraces, maturity is used to distinguish them from one another. Varieties coming from two villages of the Segou region in Mali, Bouawéré and Kagnan, were studied in 2009 and 2010, several years after *Jakumbé* was released. In 2009, 29 varieties from Bouawéré village were studied with an early sowing date June 8. In 2010, 19 varieties from Kagnan village were investigated with two planting dates June 18 and July 19.

The results show that a small proportion of the fields can be regarded as made up only of *Jakumbé* (11% for Bouawéré and Kagnan). Most fields have a bimodal distribution of maturity which identifies a blend between the landraces and *Jakumbé* (71% Bouawéré, and 47% Kagnan). The rest of the fields are composed of late-maturing cultivars (18% Bouawéré, 42% Kagnan).

As the morphology of *Jakumbé* is close to that of the landraces, farmers are not able to identify the presence of varietal blends. Without knowing it, farmers grow mostly a mix of traditional and exogenous varieties. This rapid spread of *Jakumbé* shows the interest of farmers in new earlier varieties proposed by the researchers. However, these varietal blends could contribute to the development of midge (*Stenodiplosis sorghicola*), a major pest of sorghum in sub-Saharan Africa but having little presence in Mali.

Key-words

Sorghum, Mali, photoperiodism, genetic diversity.

Introduction

Le sorgho est une céréale importante dans l'alimentation des populations du Mali. Cependant, son rendement est insuffisant pour assurer la sécurité alimentaire d'une population en augmentation rapide. Jusqu'à présent, l'accroissement de la production a surtout été assuré par l'augmentation des superficies emblavées. En raison de la saturation progressive de l'espace rural, pour faire face aux besoins à venir, le sorgho doit voir sa productivité s'accroître. Le sorgho possède plusieurs atouts, en particulier sa rusticité et ses usages multiples dans l'alimentation humaine et animale. Cependant, sa culture est soumise à des contraintes biotiques (maladies, insectes, oiseaux, adventices) et abiotiques (pauvreté des sols, sécheresse, inondations...) qui occasionnent des pertes substantielles de rendement. À cela, il faut ajouter les

difficultés d'approvisionnement en intrants agricoles ou d'accès aux marchés. En conséquence, le rendement moyen du sorgho au Mali demeure encore faible, autour d'une tonne/ha (faostat3.fao.org).

Dans la zone soudano-sahélienne, la grande diversité des cycles des cultures est un caractère clef de l'adaptation aux risques climatiques et aux différents types de conditions édaphiques. La date d'arrivée des pluies détermine en grande partie le potentiel de la campagne agricole (Sivakumar, 1988) mais est très variable d'une année sur l'autre. Les variétés locales sont le résultat de plusieurs siècles de sélection empirique qui leur a donné une bonne adaptation et la meilleure plasticité possible. C'est pourquoi la quasi-totalité des cultivars locaux sont photopériodiques, ce caractère permettant de maintenir une floraison groupée à la fin de la saison des pluies indépendamment de la date de semis (Vaksmann *et al.*, 1996, Kouressy *et al.*, 2008a). Depuis 1970, la diminution de la pluviométrie a provoqué un déplacement vers le sud des isohyètes sur l'ensemble du pays (Traoré *et al.*, 2000). Pour faire face à ce phénomène, la solution préconisée par les chercheurs, les politiques et les producteurs est l'introduction de nouveaux cultivars plus précoces. La sélection de variétés précoces a aussi été un postulat fondamental de la révolution verte (Swaminathan, 2006) et pour cette raison l'élimination du photopériodisme est devenue un préalable à la plupart des programmes d'amélioration des céréales. Les sécheresses des années 1970 dans le Sahel ont conforté cette position. L'élimination du photopériodisme devenait une nécessité pour aboutir à un matériel précoce capable de supporter des saisons des pluies de plus en plus courtes (Dancette, 1983).

Les informations sur la diffusion des nouvelles variétés précoces de sorgho en Afrique sub-saharienne sont fragmentaires et souvent contradictoires. Pour de nombreux auteurs, il est évident que la diminution de la pluviométrie a entraîné l'adoption par les paysans de variétés plus précoces que les cultivars traditionnels (Lacy *et al.*, 2006). Au Burkina Faso, les cycles des variétés de sorgho utilisées par les paysans montreraient un changement important, entraînant une diminution de 120-150 jours à 70-90 jours durant les 15 dernières années (Ingram *et al.*, 2002). Pour d'autres auteurs, au cours des 30 dernières années, la variation de durée moyenne du cycle des variétés cultivées n'aurait pas dépassé 5 jours et l'évolution du climat ne justifierait pas un changement majeur de la durée du cycle des variétés (Kouressy *et al.*, 2008b ; Chantereau *et al.*, 2010).

L'objectif de cette étude est d'étudier l'insertion de la variété améliorée précoce *Jakumbé* dans deux villages représentatifs de la région de Ségou au Mali de façon à appréhender les avantages et les risques liés à la diffusion de cette variété.

Matériel et Méthodes

Matériel végétal

Jakumbé, variété locale améliorée

Jakumbé n'est pas issue d'un programme de croisements mais de l'épuration d'une variété locale du Mali. La variété CSM63 a été identifiée pour sa précocité parmi les cultivars locaux prospectés dans la région de Kayes au Mali en 1978. Cette variété montrait une valeur alimentaire limitée en

raison de la présence d'une couche brune riche en tanins sous le péricarpe du grain. Une lignée pure, dépourvue de couche brune (CSM63E) a été identifiée dans la population et retenue pour la vulgarisation à grande échelle par l'Institut d'Economie Rurale (IER), sous la dénomination de *Jakumbé* qui veut dire littéralement « prévenir la sécheresse ». *Jakumbé* appartient au type botanique guinea, elle est de grande taille, peu photosensible et très précoce (90 jours du semis à la maturité).

Prospection des variétés locales

Dans les villages étudiés, les champs se distinguent soit par la distance aux habitations (champs proches et champs lointains) soit par le type de sol (sol lourd ou sol sableux). Une étude préalable de l'ensemble des exploitations a été réalisée. Les champs prospectés ont été tirés au hasard à partir de la liste des exploitations du village.

Variétés du village de Bouawéré

Le village de Bouawéré se trouve à proximité de la station de recherche agronomique de Cinzana et les échanges variétaux sont fréquents avec les paysans depuis la création de la station en 1983. Les tests multilocaux de CSM 63E ont débuté en 1995 mais on dispose de peu d'informations sur sa dynamique de diffusion en champs paysans. Les enquêtes réalisées dans le cadre du Projet de Renforcement des Capacités pour une Agriculture Durable (Sissoko, 2011) réalisées en janvier 2005 ont montré que 100 % des exploitations agricoles du village de Bouawéré avaient adopté la variété précoce *Jakumbé* (CSM 63E) parmi leurs variétés.

Dans ce village, huit variétés différentes, identifiées par leurs noms vernaculaires, ont été prospectées en 2009 (tableau 1). Les variétés locales les plus courantes sont *Gnognéfin* et *Gnognéblé*, littéralement « glumes noires » et « glumes rouges ». Les variétés cultivées principalement dans la zone appartiennent au type botanique guinea (*Sorghum guineense*). Les variétés présentes en petit nombre correspondent à des types botaniques variés plus rarement rencontrés dans cette zone (*Kendé*: *S. margaritifera*; *Gadiaba*: *S. durra* et *Gnimikala*: *S. bicolor*). Au total, les variétés présentes dans 29 champs ont été étudiées. Une gerbe de 30 panicules a été réalisée dans chaque champ à la récolte. L'étude en station a été réalisée sur un sous-échantillon de quatre panicules par champ. Dans notre prospection, seuls six champs ont été identifiés par le chef d'exploitation comme portant la variété *Jakumbé*.

Variétés du village de Kagnan

Dans le village de Kagnan, six variétés différentes, toutes de type guinea (*S. guineense*) ont été identifiées et prospectées en 2010 (tableau 1). Il s'agit de *Doubirou*, *Doussamina*, *Doumouso*, *Doufozo*, *Seguetana* et *Jakumbé*. Les cinq premières variétés sont des écotypes locaux tandis que la dernière variété, *Jakumbé*, a été diffusée à Kagnan en 2002 par les organisations paysannes. Au total, les variétés présentes dans 19 champs de Kagnan ont été étudiées. Une gerbe de 30 panicules a été réalisée à la récolte et l'échantillon étudié en station provient du mélange de ces grains. La totalité des variétés prospectées à Kagnan a une morphologie très semblable à *Jakumbé*. Avec huit champs sur 19 cultivés en

Jakumbé, les paysans identifient une plus grande proportion de la présence de la variété améliorée qu'à Bouawéré.

Village de Bouawéré		Village de Kagnan	
Nom vernaculaire	Nombre de champs prospectés	Nom vernaculaire	Nombre de champs prospectés
Gnognèblé	10	Jakumbé	8
Gnognèfing	7	Doubirou	3
Jakumbé	6	Doumousso	2
Kendé	1	Doussamina	3
Gnimikala	2	Seguetana	2
Bin baka wuli	1	Doufozo	1
Gadiaba	1		
Mory wèrè nio	1		

Tableau 1 : Nombre de champs prospectés par variété.

Dispositif expérimental

La phénologie des variétés prospectées dans les différents champs de chaque village a été mesurée en 2009 pour Bouawéré et en 2010 pour Kagnan.

Le dispositif expérimental utilisé pour l'étude des variétés de Bouawéré était un bloc de Fisher à deux répétitions des semences provenant des 29 champs prospectés. Quarante plantes par parcelle élémentaire ont été suivies soit 80 plantes suivies par champ. Les semences provenaient de quatre panicules différentes prélevées dans chaque champ. L'information sur la panicule d'origine de chaque plante a été conservée dans le but de mettre en évidence d'éventuels intercroisements. Le semis a été réalisé le 8 juin 2009.

L'essai de caractérisation des variétés de Kagnan a été réalisé à deux dates de semis. Le premier semis a été effectué le 18 juin et le second le 19 juillet 2010. Le dispositif expérimental a été un split-plot à deux répétitions des deux dates de semis avec la date de semis comme facteur principal et la variété comme facteur secondaire. Les semences provenaient du vrac de 30 panicules prélevées dans chaque champ. Le nombre de plantes étudiées par parcelle élémentaire était de 16 soit 32 plantes suivies par champ et par date de semis.

La variété *Jakumbé*, fournie par la recherche, a été rajoutée comme témoin dans les deux essais.

Observations et mesures

Jakumbé étant plus précoce que les variétés locales photopériodiques, la durée du cycle a été utilisée pour différencier les variétés. Un semis précoce (en juin) permet de distinguer *Jakumbé* car son cycle est plus court de 2 à 3 semaines par rapport à celui de la plupart des variétés locales. Inversement, si le semis est réalisé tardivement (après le 10 juillet), la durée du cycle des variétés locales se raccourcit jusqu'à devenir semblable à celle de *Jakumbé*.

Dans chaque parcelle élémentaire, la phénologie de toutes les plantes a été suivie. L'observateur passait régulièrement, 2 fois par semaine, et notait sur chaque plant, la date d'apparition de la ligule de la dernière feuille aussi nommée feuille drapeau. En moyenne, l'épiaison se produit 10 jours après la ligulation de la feuille drapeau et la floraison dure

ensuite environ 7 jours. Dans la suite de ce travail nous nous intéressons à la durée SFD allant du semis à l'émission de la ligule de la feuille drapeau.

Coefficient de photopériodisme

La réduction de la durée semis-feuille drapeau entre deux dates de semis est une mesure du photopériodisme des variétés. Le degré photopériodique d'une variété peut être déterminé à l'aide d'un coefficient K_p dit coefficient de photopériodisme qui est défini comme étant le rapport de la différence des durées semis à feuille drapeau (SFD) entre les deux dates sur la durée séparant ces deux dates ($D_2 - D_1$). (Clerget et al., 2007). La formule est :

$$K_p = \frac{SFD_1 - SFD_2}{D_2 - D_1}$$

La valeur de K_p est toujours comprise entre 0 et 1. Ce coefficient est proche de zéro pour les variétés non photosensibles tandis qu'il s'approche de l'unité pour les variétés très photosensibles car pour ces dernières le raccourcissement de la période végétative compense exactement le décalage de semis. Le coefficient K_p est bien adapté à la comparaison de variétés. Toutefois comme la valeur de K_p a tendance à varier avec les conditions de culture en fonction notamment de la latitude de l'essai et du choix des dates de semis, pour des études plus détaillées il est préférable d'utiliser des modèles éco-physiologiques plus précis (Abdulai et al., 2012 ; Folliard et al., 2004 ; Dingkuhn et al., 2008).

Résultats

Au total, 45% des plantes originaires de Bouawéré et 66 % des plantes originaires de Kagnan sont aussi précoces que le témoin *Jakumbé*. Ce chiffre pourrait être considéré comme une évaluation de la diffusion de *Jakumbé* dans ces villages. Les champs uniformément précoces sont peu nombreux, 11% dans les 2 villages. Nous avons surtout observé une grande proportion de champs constituée de mélanges de variétés de précocités différentes. Ce type de champ correspond à 71 % des champs de Bouawéré et 47 % des champs de Kagnan.

Étude des variétés de Bouawéré

Si on étudie la distribution de SFD parmi les descendance de chaque champ, on obtient trois types de comportements :

- Les champs uniformément précoces avec SFD de 65 jours (Fig. 1a) : ils représentent seulement 11 % des champs échantillonnés (Figure 1a) ;
- Les champs uniformément tardifs avec SFD supérieur à 80 jours (Fig. 1b) : ils représentent 18 % des champs échantillonnés (Figure 1b) ;
- Les champs constitués d'un mélange de plantes précoces et tardives (Fig. 1c et 1d) : ils représentent 71% des champs échantillonnés. Dans ces champs, on obtient une distribution bimodale de la précocité. On trouve des mélanges aussi bien sur les parcelles identifiées par l'agriculteur comme étant *Jakumbé* que sur des parcelles considérées comme étant une variété locale.

Les graphiques des Figures 2 et 3 montrent des exemples de distributions de SFD observées pour les quatre panicules individuelles de parcelles présentant des mélanges variétaux. Les champs possédant à la fois des plantes tardives et précoces sont de deux sortes :

- Dans le premier cas, les descendances des panicules prospectées présentent une précocité uniforme, les plantes étant soit tardives soit précoces (Figure 2). On peut considérer alors que les semences utilisées provenaient d'un mélange de variétés différentes ;
- Dans le second cas, les descendances des panicules prospectées présentent des mélanges de plants précoces et tardifs (Figure 3). Ce résultat montre qu'un brassage génétique s'est produit entre certaines variétés locales et *Jakumbé*. C'est une population en disjonction pour la précocité qui a été semée par le paysan. Ce cas de figure correspond à 26 % des panicules étudiées.

La variété améliorée précoce *Jakumbé* est morphologiquement très semblable à la variété locale *Gnognéblé*, ce qui explique une certaine confusion dans l'identification de ces deux variétés aux dires des producteurs. Dans les conditions naturelles, ces mélanges variétaux sont aussi difficiles à distinguer puisque le semis du sorgho à Bouawéré est souvent réalisé assez tardivement après le mil de sorte que les cycles des deux types de variétés diffèrent peu.

Par ailleurs, les variétés correspondant à des types botaniques plus rares et de morphologies spécifiques (*Gnimikala*, *Gadiaba* et *Kendé*), sont toutes homogènes pour la précocité et plus tardives que *Jakumbé*. Il n'y a pas, dans ce cas, de confusion entre les variétés.

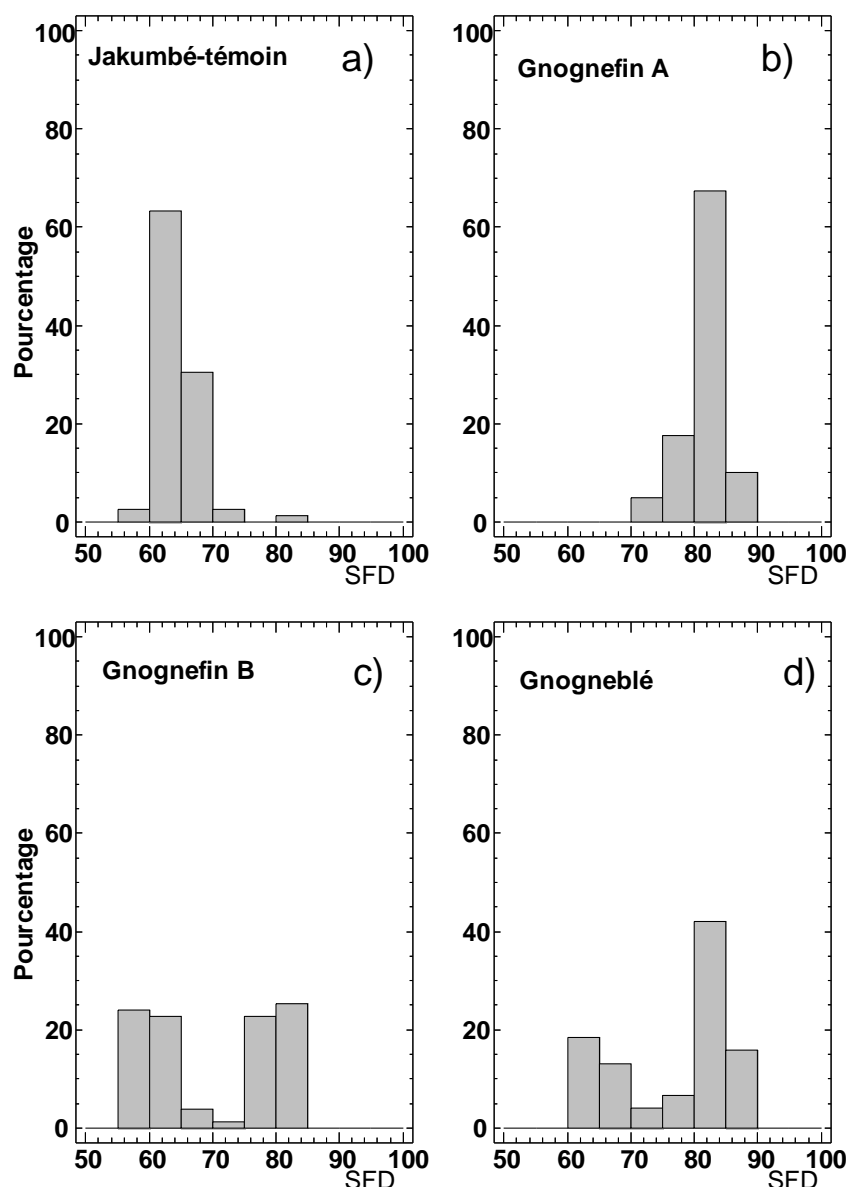


Figure 1 – Principaux types de distribution de SFD rencontrés dans les champs de Bouawéré.

a) Témoin *Jakumbé* uniformément précoce (SFD=65j), b) variété locale *Gnognefin A* uniformément tardive (SFD=82j), c) et d) variétés locales *Gnognefin B* et *Gnogneblé* présentant des distributions bimodales de SFD (plantes tardives et précoces)

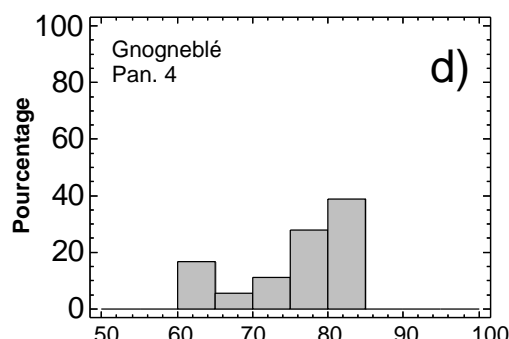
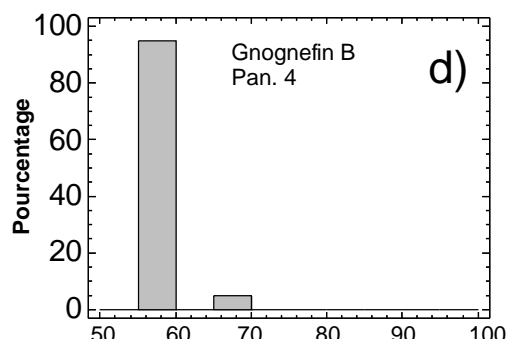
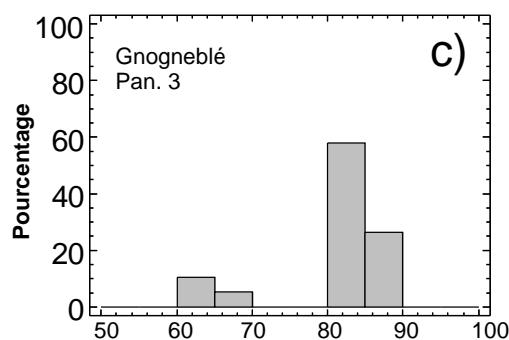
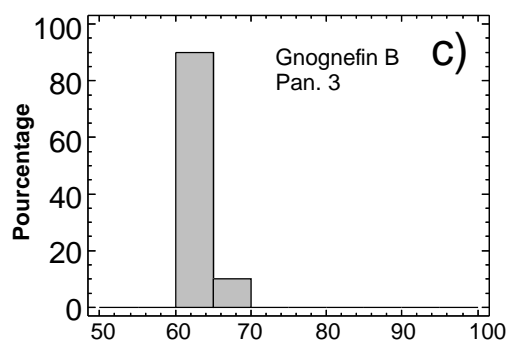
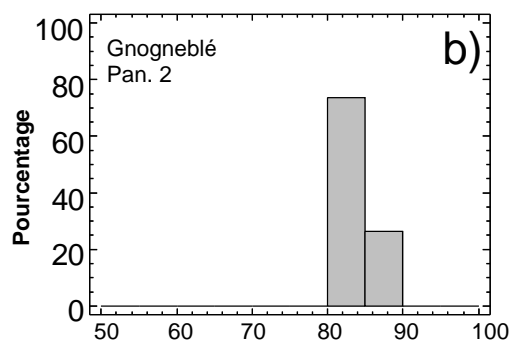
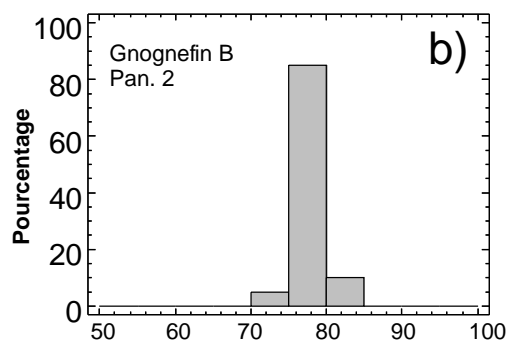
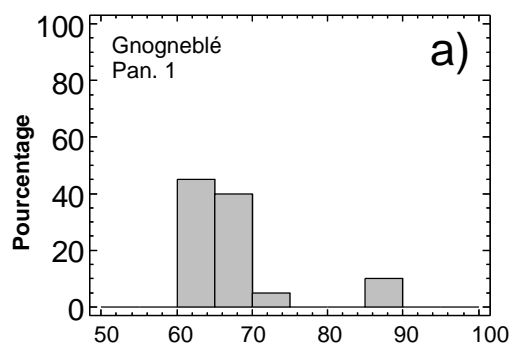
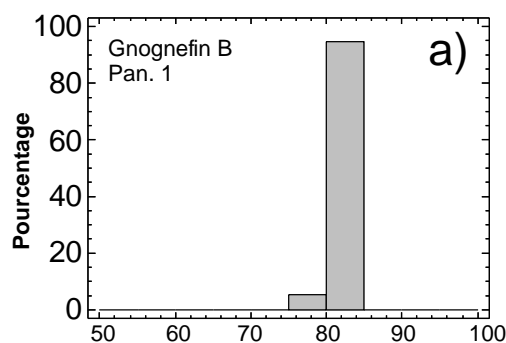


Figure 2

Figure 3

Figure 2 - Distribution SFD au sein de 4 panicules de la variété *Gnognefin B*. La distribution pour chaque panicule est homogène, soit précoce soit tardive.

Figure 3 - Distribution SFD au sein de 4 panicules de la variété *Gnogneblé*. On observe une ségrégation sur SFD au sein des descendance de trois des panicules, ce qui indique qu'il s'agit de descendance de croisements entre *Jakumbé* et une variété locale

Étude des variétés de Kagnan

Le témoin *Jakumbé* issu de la recherche est précoce (SFD = 65 jours) et la distribution de SFD est unimodale pour les 2 dates de semis (Figures 4a et 4b). Il n'en est pas de même pour les différents échantillons de *Jakumbé* prospectés en champ paysan car parmi les huit champs identifiés par les paysans comme emblavés en *Jakumbé*, un seul champ présente des plantes uniformément précoces. Toutes les autres parcelles de *Jakumbé* présentent une distribution bimodale lorsque la variété a été semée tôt (Figure 4e), indicatrice de mélanges variétaux intervenus depuis la mise en culture de la semence d'origine.

Au total, 47 % des 19 champs étudiés sur le village de Kagnan

portent des mélanges de plantes précoces et tardives. Les distributions des SFD sont bimodales et similaires à celles décrites à Bouawéré. Toutefois, comme les panicules issues d'un même champ ont été battues en mélange, il n'est pas possible dans ce cas de distinguer les mélanges de variétés et les brassages génétiques.

L'essai de caractérisation ayant été réalisé selon deux dates de semis, le comportement photopériodique de chacune des descendance des variétés collectées en champ paysan a pu être étudié. L'effet de la date de semis sur la durée du cycle est faible pour le témoin *Jakumbé* (Figures 4a et 4b) dont le cycle se raccourcit de 6 jours, ce qui correspond à un coefficient de photopériodisme faible ($K_p = 0.19$). Cet effet est nettement plus marqué pour les variétés locales (Figures

4c et 4d) dont le cycle se raccourcit en moyenne de 21 jours, ce qui correspond à un coefficient de photopériodisme élevé ($K_p=0.68$).

Quelle que soit l'origine de la semence, la distribution des SFD au second semis prend toujours un aspect monomodal,

les précocités deviennent très semblables, ce qui explique la difficulté à identifier les mélanges variétaux en cas de semis tardif.

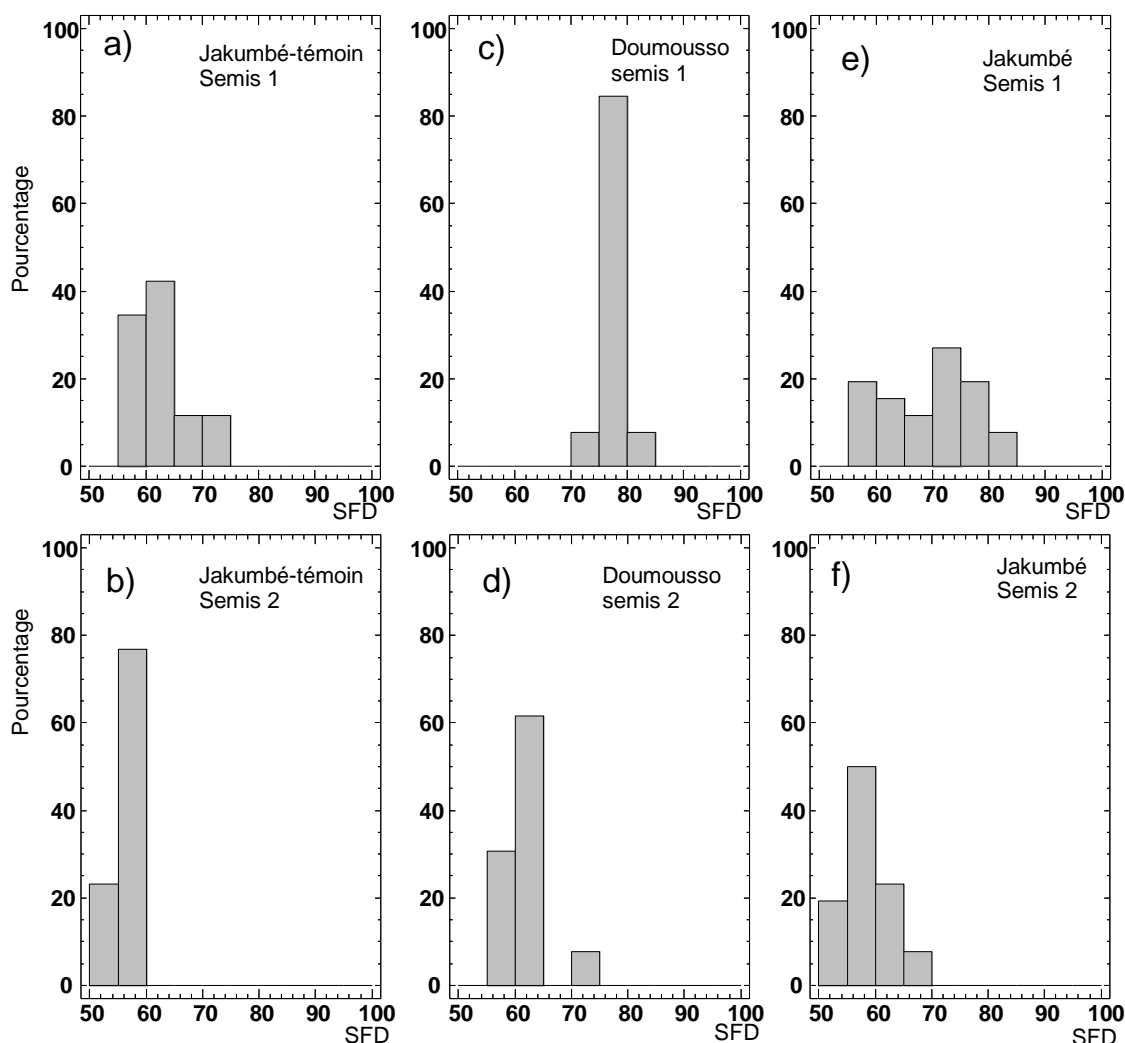


Figure 4 - Comparaison des distributions de SFD rencontrés dans quelques champs de Kagnan pour les deux dates de semis. a et b témoin *Jakumbé* uniformément précoce (SFD=63j et SFD = 57jours), c et d variété locale *Doumoussou* uniformément tardive (SFD=77j et SFD =62j), e et f variété *Jakumbé* prospectée en champ paysan. La distribution bimodale pour le premier semis indique l'existence de mélanges variétaux.

Discussion et conclusion

La variété *Jakumbé* a été récemment introduite dans le milieu (1995 à Bouawéré et 2002 à Kagnan) et fortement diffusée ces dernières années à partir de la station de recherche agronomique de Cinzana. Les études antérieures n'avaient pas montré la présence de variétés aussi précoces que *Jakumbé* dans les zones de Bouawéré et Kagnan (IER, 1991 ; Bah, 2009).

Nos essais expérimentaux nous ont permis de montrer l'existence de mélanges variétaux dans un même champ: les plantes précoces observées proviendraient de *Jakumbé* tandis que les plantes tardives proviendraient des variétés locales. Les résultats de ces essais montrent qu'une faible proportion des champs peut être maintenant considérée comme composée uniquement de *Jakumbé* (11 % à Bouawéré comme à Kagnan) et que par contre, une grande proportion de champs est constituée de mélanges variétaux (71% à Kagnan et 46 % à Bouawéré).

L'existence de mélanges de variétés dans un même champ peut avoir des causes diverses :

- La précocité de *Jakumbé* devrait permettre de maintenir un certain isolement génétique mais lorsque le semis est réalisé tardivement, sa floraison devient synchrone avec celle des variétés locales, ce qui rend possible la réalisation d'intercroisements. Ce brassage expliquerait l'apparition de descendance hybrides avec une disjonction pour la précocité.
- Même si les semences et le grain de consommation sont généralement conservés séparément, les paysans prélèvent fréquemment un complément de semences dans leurs greniers où les panicules de même aspect peuvent se mélanger.

La diffusion rapide de *Jakumbé* dans la région de Ségou au Mali montre l'intérêt des paysans pour les nouvelles variétés proposées par la recherche. C'est un phénomène nouveau car les résultats antérieurs présentaient plutôt des taux d'adoption des variétés améliorées très faibles (Matlon, 1985; Stoop *et al.*, 1982; vom Brocke *et al.*, 2008). Le recours aux méthodes de sélection participative, le rôle actif donné aux paysans et l'implication de différents acteurs incluant les organisations paysannes, les structures privées et l'Etat favorisent certainement l'adoption des nouvelles variétés (Sanou *et al.*, 2014).

Cette diffusion rapide semble favorisée par la ressemblance morphologique de *Jakumbé* avec les variétés locales de type botanique guinea préexistantes dans le milieu. *Jakumbé* ressemble beaucoup à la variété locale *Gnognéblé* de Bouawéré et à la variété *Doubirou* de Kagnan. Les champs constitués d'un mélange de plantes précoces et tardives ne concernent que des variétés de type botanique guinea, qu'elles soient identifiées par les paysans comme locales ou non. La variété introduite *Jakumbé* s'intègre donc naturellement dans le milieu d'autant plus que les paysans ne sont pas toujours capables de la distinguer et pratiquent leur propre sélection de semences. Ainsi, le recyclage des semences de sorgho ainsi que les critères de sélection des agriculteurs individuels peut contribuer à une augmentation de plantes hors-type dans les agro systèmes Sahéliens (Deu *et al.*, 2014).

Les avis des agronomes sur l'intérêt de vulgariser des variétés plus précoces que les locales sont assez contradictoires. Le principal intérêt de la précocité est de permettre de faire face aux périodes de disette fréquentes avant la récolte principale de l'année (période de soudure). Les paysans disposent généralement de variétés précoces pour assurer l'approvisionnement de la famille pendant cette période. Ces variétés sont souvent moins productives et cultivées sur de petites parcelles proches du village pour faciliter la surveillance contre les oiseaux. Toutefois, les variétés précoces ne sont pas adaptées à la production principale pour de multiples raisons, principalement biotiques (Sissoko *et al.*, 2008). Si la maturité a lieu avant la fin de la saison des pluies, les moisissures altèrent le grain et affectent la qualité germinative des semences qui ne germeront pas l'année suivante (Luce, 1994).

Les paysans apprécient la précocité de *Jakumbé* et la destinent au créneau de semis retardés même si les paysans évitent généralement de retarder leurs semis après le début des pluies.

Les systèmes de culture traditionnels sont basés sur la rapidité du semis dès les premières pluies (Viguié, 1947, Soumaré *et al.*, 2008). Les semis précoces facilitent la maîtrise de l'enherbement par les paysans, évitent la pression de certains insectes (*Atherigona soccata*) et améliorent l'installation de la culture qui profite des pics d'azotes en début de la saison des pluies. Retarder volontairement le semis après le début des pluies correspond donc à une prise de risque important. De plus, on a vu (Figure 4) qu'en cas de semis tardif, la phénologie des différents types variétaux tend à se confondre, il n'y a donc pas de raison d'attendre un meilleur comportement de *Jakumbé* dans ces conditions.

Si l'on désire conserver le caractère de précocité de *Jakumbé*, le recours à des semences contrôlées semble nécessaire. Il faudrait aussi éviter de cultiver à proximité les champs portant des variétés précoces et tardives mais cette proposition semble très difficile à mettre en œuvre pour des variétés aussi semblables morphologiquement et serait probablement insuffisante comme le montrent des études récentes. Une étude conduite dans un village du Sud Mali a montré que les flux de gènes se faisaient préférentiellement en direction de la variété introduite de sorgho qui était de type morphologique différent des variétés locales (Deu *et al.*, 2014). Un résultat similaire a été obtenu dans un agrosystème traditionnel du Kenya (Labeyrie *et al.*, 2014), dans lequel les flux de gènes se faisaient aussi préférentiellement vers la variété introduite, morphologiquement proche des variétés locales mais s'en différenciant par la couleur du grain.

Notre étude a confirmé l'existence de flux de gènes des variétés locales vers la variété introduite mais aussi dans l'autre sens. Elle a de plus montré que la diffusion de *Jakumbé* entraînait la mise en culture d'une majorité de champs présentant des mélanges de plantes de précocités différentes. Cette situation est fortement déconseillée dans la région car susceptible de contribuer au développement d'un ravageur important du sorgho, la Cécidomyie (*Stenodiplosis sorghicola*). Les populations de Cécidomyie sont peu importantes au moment des premières floraisons mais augmentent régulièrement au cours du temps si l'insecte trouve de nouvelles floraisons pour se multiplier. Les dernières floraisons sont donc confrontées à une très forte population de Cécidomyie qui peut provoquer une destruction totale de la récolte. Les pullulations sont traditionnellement limitées par la mise en culture de variétés de type local dont la floraison est groupée (Etasse, 1977). Si au Burkina Faso, la Cécidomyie est considérée comme un ravageur essentiel du sorgho (Dakouo *et al.*, 2005), les dégâts causés par cet insecte sont, pour l'instant, considérés comme un problème mineur au Mali. Cependant, on peut craindre que la culture de mélanges variétaux provoque, à l'avenir, un développement de la Cécidomyie dans la zone de forte diffusion de *Jakumbé*.

Notre étude qui combine des résultats d'enquête et des caractérisations phénologiques nous permet de mieux caractériser et comprendre cette adoption et d'évaluer son impact dans l'agrosystème traditionnel, en particulier sur les variétés locales.

Le matériel fourni aux agriculteurs et brassé avec les variétés locales évoluera probablement de façon dynamique en équilibre avec l'environnement (climat, pression phytosanitaire, sol) favorisant l'apparition de nouvelles variétés populations mieux adaptées à l'environnement que la variété vulgarisée *Jakumbé*. Nos résultats permettent de prendre date de l'état actuel de la diffusion de *Jakumbé* et pourront servir de référence pour des suivis ultérieurs.

Bibliographie

Abdulai, A.L., Kouressy, M., Vaksman, M., Asch, F., Giese, M. and Holger, B., 2012. Latitude and Date of Sowing

- Influences Phenology of Photoperiod-Sensitive Sorghums. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 198(5): 340-348
- Bah, A., 2009. Etude de la durée du cycle de 49 variétés de sorgho provenant de cinq zones agroclimatiques différentes du Mali, l'Institut Polytechnique Rural de Formation et de Recherche Appliquée (IPR/IFRA) de Katibougou, 77 pp
- Chantereau, J., Deu, M., Pham, J.L., Kapran, I., Vigouroux, Y. and Bezançon, G., 2010. Evolution des diversités phénotypique et génétique des sorghos et mils cultivés au Niger de 1976 à 2003. Le sélectionneur français, 61: 33-45
- Clerget, B., Rattunde, H.F.W., Dagnoko, S. and Chantereau, J., 2007. An easy way to assess photoperiod sensitivity in sorghum: Relationships of the vegetative-phase duration and photoperiod sensitivity, SAT eJournal
- Dakouo, D., Trouche, G., Malick, N.B., Neya, A. and Kaboré, K.B., 2005. Lutte génétique contre la cécidomyie du sorgho, *Stenodiplosis sorghicola* : une contrainte majeure à la production du sorgho au Burkina Faso. *Cahiers Agricultures*, 14(2) : 201-208
- Dancette, C., 1983. Besoins en eau du mil au Sénégal. *Adaptation en zone semi-aride tropicale*. *Agronomie Tropicale*, 38(4): 267-280
- Deu, M., Weltzien, E., Calatayud, C., Traoré, Y., Bazile, D., Gozé, E., Trouche, G. and vom Brocke, K., 2014. How an improved sorghum variety evolves in a traditional seed system in Mali: Effects of farmers' practices on the maintenance of phenotype and genetic composition. *Field Crops Research*, 167:131-142
- Dingkuhn, M., Kouressy, M., Vaksman, M., Clerget, B. and Chantereau, J., 2008. A model of sorghum photoperiodism using the concept of threshold-lowering during prolonged appetite. *European Journal of Agronomy*, 28: 74-89
- Etasse, C., 1977. Synthèse des travaux sur le sorgho. *Agronomie Tropicale*, 32(3): 311-318
- Folliard, A., Traoré, P.C.S., Vaksman, M. and Kouressy, M., 2004. Modeling of sorghum response to photoperiod: a threshold-hyperbolic approach. *Field Crops Research*, 89: 59-70
- IER, 1991. *Projet Sol Eau Plante - Résultats de la campagne 1990-1991*, Institut d'Economie Rurale
- Ingram, K.T., Roncoli, M.C. and Kirshen, P.H., 2002. Opportunities and constraints for farmers of west Africa to use seasonal precipitation forecasts with Burkina Faso as a case study. *Agricultural Systems*, 74(3): 331-349
- Kouressy, M., Dingkuhn, M., Vaksman, M. and Heinemann, A.B., 2008a. Adaptation to diverse semi-arid environments of sorghum genotypes having different plant type and sensitivity to photoperiod. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(3): 357-371
- Kouressy, M., Traoré, S.B., Vaksman, M., Grum, M., Maikano, I., Soumaré, M., Traoré, P.S., Bazile, D., Dingkuhn, M. and Sidibé, A., 2008b. Adaptation des sorghos du Mali à la variabilité climatique. *Cahiers Agricultures*, 17(2): 95-100
- Labeyrie, V., Deu, M., Barnaud, A., Calatayud, C., Buiron, M., Wanbugu, P., Manel, S., Glaszmann, J.C. and Leclerc, C., 2014. Influence of Ethnolinguistic Diversity on the Sorghum Genetic Patterns in Subsistence Farming Systems in Eastern Kenya. *Plos One*, 9 (3): e92178
- Lacy, S.M., Cleveland, D.A. and Soleri, D., 2006. Farmer Choice of Sorghum Varieties in Southern Mali. *Human Ecology*, 34(3): 331-353
- Luce, C., 1994. Influence des conditions de production des semences de sorgho sur la levée au champ. *Agriculture et Développement*, 1: 43-46
- Matlon, P.J., 1985. A critical review of objectives, methods and progress to date in sorghum and millet improvement: Case study of ICRISAT/Burkina Faso. In: U.d. Purdue (Editor), *Technologies appropriées pour les paysans des zones semi-arides de l'Afrique de l'ouest*, pp. 181-211
- Sanou, A., Adam, M., vom Brocke, K. and Trouche, G., 2014. Enquêtes sur l'adoption et la diffusion de variétés de sorghos issues de la sélection participative dans les régions Centre-Nord et Boucle du Mouhoun. *INERA*, 43 pp
- Sissoko, S., 2011. Vulnérabilité et stratégies d'adaptation paysannes aux contraintes climatiques et socio-économiques. Master, Université de Bamako, 107 pp
- Sissoko, S., Doumbia, S., Vaksman, M., Hocdé, H., Bazile, D., Sogoba, B., Kouressy, M., Vom Brocke, K., Coulibaly, M.M., Touré, A. and Dicko, B.G., 2008. Prise en compte des savoirs paysans en matière de choix variétal dans un programme de sélection. *Cahiers Agricultures*, 17(2): 128-133
- Sivakumar, M.V.K., 1988. Predicting rainy season potential from the onset of rains in Southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa. *Agricultural and Forest Meteorology*, 42(4): 295-305
- Soumaré, M., Kouressy, M., Vaksman, M., Maikano, I., Bazile, D., Traoré, P.S., Traoré, S., Dingkuhn, M., Touré, A., Vom Brocke, K., Somé, L. and Barro Kondombo, C.P., 2008. Prévision de l'aire de diffusion des sorghos photopériodiques en Afrique de l'ouest. *Cahiers Agricultures*, 17(2): 160-164
- Stoop, W.A., Pattanayak, C.M., Matlon, P.J. and Root, W.R., 1982. Stratégie pour augmenter la productivité de l'agriculture de subsistance dans les zones tropicales semiarides de l'Afrique de l'Ouest. Article occasionnel n°1. *ICRISAT. Programme de coopération internationale*, pp. 17
- Swaminathan, M.S., 2006. An Evergreen Revolution. *Crop Science*, 46(5): 2293-2303
- Traoré, S.B., Reyniers, F.-N., Vaksman, M., Koné, B., Sidibé, A., Yoroté, A., Yattara, K. and Kouressy, M., 2000. Adaptation à la sécheresse des écotypes locaux de sorghos du Mali. *Sécheresse*, 11(4): 227-237
- Vaksman, M., Traoré, S.B. and Niangado, O., 1996. Le photopériodisme des sorghos africains. *Agriculture et Développement*, 9: 13-18
- Viguié, P., 1947. *Les Sorghos et leur culture au Soudan Français*. Grande Imprimerie de Dakar, 80 pp

Vom Brocke, K., Trouche, G., Zongo, S., Abdramane, B., Barro-Kondombo, C.P., Weltzien, E. and Chanterreau, J., 2008. Création et amélioration de populations de sorgho à base large avec les agriculteurs au Burkina Faso. Cahiers Agricultures, 17(2): 146-153.

Quel potentiel de modèles alternatifs d'amélioration des plantes ?

Questions induites par la diffusion des variétés de tournesol tolérantes à des herbicides de la famille des inhibiteurs de l'ALS

Valentin BEAUVAL*

*Agronome ayant été agriculteur en GAEC de 1981 à 2010 dans le Saumurois dans une ferme spécialisée en grandes cultures et diverses semences. Notre système de culture a été fortement influencé par l'approche « agriculture intégrée »¹⁵. Nous avons cultivé du tournesol et du colza pendant 30 ans dans des rotations le plus souvent quadriennales. En tournesol, nos rendements moyens annuels ont fluctué entre 28 et 35 quintaux par hectare. L'utilisation d'herbicides a toujours été limitée avec un IFT moyen inférieur à 1 dès les années 2000 (IFT = Indicateur

de Fréquence de Traitement¹⁶). Le binage mécanique de nos parcelles de tournesols (et parfois colzas) a été systématique dès la fin des années 80 grâce à un équipement performant (bineuse 6 rangs sur porte outil) géré en groupe.

Par ailleurs, membre jusqu'en fin 2012 d'un groupe créé dans le cadre d'Ecophyto 2018 pour suivre l'évolution des pollutions des eaux par les pesticides, groupe piloté par la DREAL des Pays de Loire. Également depuis les années 80, consultant AVSF (Agronomes et vétérinaires sans frontières), CIRAD (Centre international de recherche agronomique et de développement), IRAM (Institut de recherche sur les méthodes de développement), GRET (Groupe de recherche et d'étude technologique) et FFEM (Fonds français pour l'environnement mondial) sur des problématiques de développement rural et d'agroécologie.

Introduction

Dans un pays ayant choisi de mettre en place le plan Ecophyto 2018 visant la réduction de l'usage de 50% des pesticides d'ici 2018 et souhaitant être l'un des leaders en Europe en matière d'agroécologie, la diffusion à grande échelle de variétés de tournesol (environ 200.000 ha en 2013 soit le tiers des superficies françaises) et bientôt de colza rendues, par mutagenèse, tolérantes à des herbicides, posent de nombreuses questions.

(NB : le terme VTH sera utilisé dans cet article pour désigner ce type de variétés. La liste des autres sigles utilisés figure en annexe 2).

Dans le cas des VTH tournesol et colza, ce questionnement est amplifié par le fait que la tolérance concerne des herbicides de la famille des inhibiteurs d'ALS, famille d'herbicides très fréquemment utilisée dans nos systèmes de grande culture et pour laquelle de nombreuses résistances sont déjà signalées dans de nombreux pays du Monde. Une des questions centrales abordées dans cet article sera donc les possibles incidences de ces VTH tournesol (et bientôt colza) sur les systèmes de grandes cultures (au niveau exploitation et territoire) et l'analyse des mesures prises dans le cadre du « plan VTH » adopté fin 2012, plan impliquant le

CETIOM, InVIVO, la FNA, etc... ainsi que les organismes commercialisant ces VTH.

Cet article est essentiellement centré sur les questions agronomiques posées par les VTH tournesol et il n'évoque pas d'autres questions importantes comme, par exemple, la nécessité ou non d'informer les agriculteurs, les acteurs des filières concernées voire les consommateurs sur la forme de mutagenèse utilisée¹⁷. Un agriculteur qui utilise ces variétés n'a en effet pas d'informations sur ces points car, dans l'UE, les VTH sont protégées par de simples Certificats d'Obtention Végétale (COV) alors que des brevets concernant la mutagenèse sont associés à leur conception (avec le COV et contrairement au brevet, l'obteneur n'a pas l'obligation de décrire et de diffuser le mécanisme détaillé d'obtention des variétés qu'il propose à l'inscription).

Rappels concernant les variétés VTH et le développement de résistances aux herbicides inhibiteurs de l'ALS

Les résistances exploitées commercialement dans les variétés VTH de tournesol et colza reposent en général sur des mutations¹⁸ de l'enzyme acétolactate synthase [ALS], plus souvent désignée sous le nom d'acétohydroxyacide synthase [AHAS]. Cet enzyme joue un rôle clef dans la synthèse des acides aminés ramifiés [*leucine, isoleucine, valine*] et est la cible des herbicides du groupe B [classification HRAC], en particulier les imidazolinones et sulfonylurées.

Parmi les herbicides inhibiteurs de l'acétolactatesynthétase (ALS), on note des matières actives qui sont actuellement très utilisées pour les céréales à paille, le maïs et de nombreuses autres cultures :

- * Sulfonylurées (metsulfuron, iodosulfuron, mesosulfuron, etc.) ;
- * Triazolopyrimidines (florasulame, pyroxsulame, méto-sulame) ;
- * Sulfonylamino-carbonyl-triazolinones (propoxycarbazone sodium) ;
- * Imidazolinones (imazamox).

La très large utilisation de ces herbicides se traduit dans de nombreux pays par l'apparition d'un nombre croissant d'adventices résistantes. Le graphique ci-dessous représente, au niveau mondial et selon le site d'action des herbicides, le nombre d'espèces devenues résistantes (source WeedScience – 2014). La courbe ayant la plus forte pente concerne les écotypes résistants aux inhibiteurs d'ALS. Plus de 140 espèces ont été recensées en 2014 dont le coquelicot et le vulpin.

¹⁷ Les VTH tournesol et colza sont le plus souvent obtenues grâce à des mutations provoquées par l'utilisation de produits chimiques ou de rayonnements ionisants. Elles devraient logiquement rentrer dans le cadre de la directive UE 2001/18 : Article 2 – Définition : Un organisme génétiquement modifié (OGM) est un organisme, à l'exception des êtres humains, dont le matériel génétique a été modifié d'une manière qui ne s'effectue pas naturellement par multiplication et/ou par recombinaison naturelle. Toutefois l'annexe 1B mentionne : Les techniques/méthodes de modification génétique produisant des organismes à exclure du champ d'application de la présente directive (...) sont : 1. la mutagenèse ; 2. la fusion cellulaire... Pour en savoir plus sur l'évolution des méthodes de sélection, voir Lusser M., Parisi C., Plan D., Rodriguez-Cerezo E. (2011). New plant breeding techniques. State-of-the-art and prospects for commercial development, European Commission, Joint Research Center (JRC), EUR 24760 EN.

¹⁸ Pour les variétés de Tournesol résistantes à des herbicides, on peut citer deux procédés : Express Sun issu d'une mutation induite et Clearfield, issu d'une mutation spontanée parfois renforcée par une mutation induite (les deux types de variétés étant cultivés en France depuis 2010). Pour le colza, il s'agit de mutations induites par l'homme.

¹⁵ Cf. l'ouvrage de Philippe Viaux, ex cadre d'Arvalis : « La troisième voie en grandes cultures ».

¹⁶ L'Indicateur de Fréquence de Traitement (IFT) correspond au « nombre de doses homologuées » appliquées sur une parcelle pendant une campagne culturale. La dose homologuée est définie comme la dose efficace d'application d'un produit sur une culture et pour un organisme cible donnés. En conséquence, l'IFT reflète la « pression phytosanitaire » exercée sur la parcelle et sur l'environnement ainsi que la dépendance des agriculteurs vis à vis de ces produits.

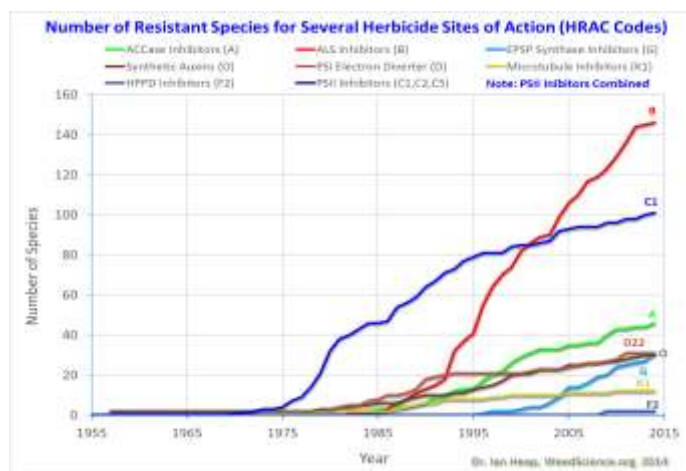


Figure 1 - Nombre d'espèces résistantes pour différents herbicides (Heap, 2014)

Un article daté du 23 octobre 2012, disponible sur le site <http://www.arvalis-infos.fr> et intitulé « La généralisation des inhibiteurs de l'ALS favorise le développement des résistances » mentionne :

« En l'absence de résistances, les inhibiteurs de l'ALS, une enzyme spécifique des végétaux, agissent efficacement à faible dose. De plus, ils présentent un bon profil environnemental. Le contexte est donc extrêmement favorable à leur utilisation répétée » - « Cependant, leur utilisation répétée produit très rapidement des adventices résistantes par mutation de la cible de fixation de l'inhibiteur à l'enzyme. En règle générale, les phénomènes de résistance sont constatés après 3 à 5 utilisations des inhibiteurs de l'ALS ».

Questions agronomiques liées à l'utilisation des VTH

L'utilisation de ces variétés permettra-t-elle une amélioration des rendements et des marges économiques des parcelles de tournesol ?

Selon les essais du CETIOM, l'utilisation de ces variétés rendues par mutagenèse tolérantes à des herbicides favoriserait l'amélioration des rendements, du moins en comparaison de variétés similaires non VTH et dans des conditions spécifiques d'envahissement du tournesol par des adventices difficiles à détruire avec les herbicides classiques utilisés avant la levée.

Il est nécessaire de rappeler que, pour la destruction des dicotylédones dans des variétés classiques de tournesol, aucun herbicide de post-levée n'était jusqu'à présent officiellement homologué. Signalons cependant qu'avec l'appui d'organismes de conseil ou de ceux leur commercialisant les intrants, certains agriculteurs utilisent à dose réduite en postlevée des herbicides homologués pour une utilisation en prélevée¹⁹. Leur IFT est alors réduit par rapport aux agriculteurs utilisant les doses classiques homologuées.

¹⁹ L'herbicide Challenge est parfois utilisé à dose réduite (1 à 1,8 l) en post levée du tournesol mais, comme le mentionnait les guides tournesol du CETIOM des années 90, il peut induire une phytotoxicité visuelle lorsque les conditions climatiques ne sont pas favorables. Dans sa brochure tournesol 2013, Agriconseil indique que, moyennant certaines précautions, plusieurs herbicides utilisables en prélevée peuvent être utilisés en post levée en mélange et à de très faibles doses : « Tout comme d'autres cultures, le désherbage tournesol peut se gérer en post levée en réduction de doses. La base Challenge + Prowl reste efficace sur une flore plutôt classique. Toutefois, les mélanges 3 voies permettent d'augmenter significativement les efficacités sur des flores plus complexes ». Comme exemple de mélange utilisable en post levée mentionné par Agriconseil : Challenge 0.1 à 0.2 + Prowl 0.1 à 0.2 + Nikeyl 0.1 à 0.2 + Mercantor Gold 0.2.

Le binage mécanique représente une solution de secours en cas de présence importante d'adventices. Bien que le tournesol soit une des plantes les plus faciles à biner mécaniquement, choisir cette option peut s'avérer difficile pour les producteurs de tournesol n'ayant pas d'équipements de binage performants ou ne disposant pas d'assez de temps en regard de leurs superficies emblavées.

Le binage est cependant une pratique agronomiquement plus satisfaisante que l'application d'herbicides et il peut présenter d'autres avantages pouvant accroître les rendements : réchauffement de la terre et minéralisation de la matière organique, économie d'eau, etc. Par ailleurs, les équipements de binage sont devenus de plus en plus performants ces dernières années²⁰ et ils sont économiquement viables, en particulier s'ils peuvent être achetés en groupe, avec parfois des aides spécifiques. Si le terrain n'est pas trop dénivélé ou trop pierreux, le temps de travail nécessaire est souvent de moins d'une heure à l'hectare.

En parallèle, le coût des herbicides de post levée utilisables dans le cadre des VTH n'est pas anodin : 50 euros/ha pour l'Express SX associé au Trend et plus de 70 euros/ha pour le Pulsar 40.

Vu ce qui précède, les résultats des essais sur les VTH mentionnés dans les guides de culture CETIOM à large diffusion devraient comporter des comparaisons entre les itinéraires avec utilisation d'un herbicide post levée spécifique VTH et des itinéraires comprenant un ou deux binages. Ces comparaisons pourraient porter sur les marges à l'hectare, voire la rémunération du travail et pas seulement sur les rendements. Diffuser largement ce type d'informations pourrait inciter les agriculteurs à faire évoluer leurs pratiques vers l'agroécologie.

L'adoption des VTH est-elle une solution facilitant le désherbage du tournesol ?

Le fait de disposer d'une solution de désherbage facile à mettre en œuvre en post levée du tournesol est indéniablement positif, en particulier pour détruire les repousses de tournesol non VTH (Cf. § II.5). Même si elle entraîne des surcoûts, cette solution peut être attractive pour des agriculteurs non équipés en matériel performant de binage et ayant des parcelles fortement envahies par des adventices difficiles à détruire par les herbicides classiques. Parmi ces adventices, on peut citer l'ambrosie qui explose si elle n'est pas correctement maîtrisée. Pour les pays de l'Est et les régions du Sud de l'Europe, l'orobanche parasite constitue également une menace.

Toutefois, il ne semble pas que l'on se soit suffisamment interrogé sur les facteurs ayant induit le développement de ces adventices dans les cultures de tournesol. Parmi ces facteurs, différentes publications²¹ mentionnent des rotations trop courtes de type tournesol-blé ! On sait pourtant qu'accroître la biodiversité cultivée dans les systèmes de culture et allonger la longueur des rotations sont des solu-

²⁰ Comme le mentionnait très justement le guide de culture CETIOM tournesol 2013 : « Les bineuses équipées de caméra vidéo, cellules infrarouges ou système GPS augmentent la précision du travail et le débit de chantier sans alourdir pour autant les charges de mécanisation ».

²¹ Parmi ces publications, un diaporama d'Arvalis intitulé « Résistance des adventices aux herbicides : Enjeux et moyens de gestion » et deux notes publiées sur Arvalis-infos.fr : (1) en septembre 2011 « Consommer les inhibiteurs d'ALS avec modération » et (2) le 23-10-2012 « La généralisation des inhibiteurs de l'ALS favorise le développement de résistances ».

tions mises en avant pour réduire l'usage des pesticides et évoluer vers des pratiques plus agroécologiques...

On sait que, pour le tournesol, le non-respect des rotations préconisées par le CETIOM (4 ans avant un retour dans les premiers guides tournesol diffusés aux agriculteurs dans les années 80) a induit dans de nombreuses régions le développement d'adventices spécifiques et de maladies fongiques préjudiciables aux rendements (sclérotinia par exemple), facteurs ayant, parmi d'autres, contribué à la quasi-stagnation des rendements de cette culture malgré les indéniables progrès génétiques réalisés²².

Ainsi, cette solution serait pertinente à court terme pour les agriculteurs qui sont dans une situation d'enherbement difficile mais ne sera-t-elle pas pénalisante à moyen ou long terme si ces VTH permettent *in fine* de conforter la poursuite de systèmes de culture basés sur des rotations trop courtes de type Tournesol-Blé ? Un tel risque est mentionné dans l'étude INRA coordonnée par JM Meynard sur les freins et leviers à la diversification des cultures²³, certaines solutions techniques favorisant, selon les conclusions de cette étude, la poursuite du système de culture qui les ont rendu utiles, voire nécessaires.

La diffusion de variétés tolérantes à des herbicides de la famille des ALS est-elle positive en terme de réduction de l'usage des pesticides sur les parcelles de tournesol ?

Les firmes ayant mis sur le marché les VTH tournesol et colza affirment que leurs variétés réduisent l'utilisation des herbicides. De plus, à l'occasion d'une audition réalisée en 2012 à l'assemblée nationale par le député de la Loire Dino Cinieri, des responsables de la filière oléoprotéagineuse française ont cité les VTH comme exemple d'innovation contribuant à l'objectif de double performance économique et écologique souhaitée par le Ministère de l'Agriculture. Le colza Clearfield® de BASF serait ainsi « une innovation alliée de l'agroécologie ».

Ce point est important et mérite un développement détaillé permettant d'éviter certaines affirmations à l'évidence scientifiquement mal étayées :

- Les herbicides Pulsar 40 et Express SX préconisées sur des variétés tolérantes spécifiques ont un spectre d'activité le plus souvent insuffisant (par exemple, l'Express SX est inefficace sur graminées et sur liseron et le Pulsar 40 est peu efficace sur plusieurs graminées et inefficace sur séneçon, liseron et mercuriale). En conséquence, les programmes de désherbage proposés par le CETIOM dans le cas des VTH ne s'affranchissent pas des matières actives herbicides classiques appliquées avant la levée et le nombre de traitements herbicides augmente (un ou deux traite-

ments avant semis + traitement après levée, voire deux traitements après levée à demi-dose).

Ainsi, le guide CETIOM tournesol 2014 mentionne que, pour lutter contre l'ambrosie à feuille d'armoïse, il faut appliquer en prélevée le Racer ou le Nikeyl à pleine dose puis le Pulsar ou l'Express SX également à pleine dose. L'IFT herbicide des variétés VTH est dans ce cas de 2 alors que l'IFT moyen herbicide en France pour le tournesol était proche de 1,75 ces dernières années. Pour d'autres adventices gênantes (Ammi majus et autres ombellifères, raygrass ou tournesols sauvages et repousses de tournesol), les matières actives de prélevée sont également préconisées à des doses importantes (2/3 de dose ou dose pleine).

En conséquence, nous estimons que, sauf exceptions à identifier (doses des matières actives utilisées en prélevée très réduites ?), cultiver des VTH contribuera le plus souvent à augmenter l'IFT des parcelles de tournesol et ce d'autant plus que croiser des herbicides de mode d'action différent à dose entière est considéré comme souhaitable pour éviter l'apparition d'adventices résistantes lesquelles sont déjà très nombreuses pour les herbicides de type inhibiteurs de l'ALS (cf. graphique du chapitre I ci-dessus).

- Sur le plan des quantités de matières actives herbicides utilisées par ha, l'impact de l'utilisation de VTH peut s'avérer positif si l'on diminue nettement les matières actives classiques utilisées avant la levée. En effet, comme l'indique l'annexe 1 élaborée à partir des données de l'index ACTA 2013, le Pulsar 40 ou l'Express SX s'utilisent à de faibles dosages à l'hectare (30 à 60 grammes de matière active) alors que les herbicides de prélevée sont homologués à des doses par hectare de 0,5 kg (cf. Racer) voire plus de 2 kg de matière active (cf. Challenge 600).

- Sur le plan du profil toxicologique des matières actives et des produits employés, l'annexe 1 mentionne les caractéristiques du Pulsar 40, de l'Express SX et du Trend associés ainsi que celles des herbicides classiques utilisés en prélevée. On note la présence de phrases de risques préoccupantes pour plusieurs produits, en particulier des produits utilisés en prélevée alors que le profil toxicologique des 2 herbicides que tolèrent les VTH semble moins préoccupant.

- Sur le plan des choix d'herbicides pour les autres cultures de la rotation, les conséquences de l'utilisation d'herbicides inhibiteurs de l'ALS sur tournesol (et colza) se traduiront inéluctablement par une réduction des choix possibles sur les autres cultures (céréales à paille, maïs et pois). Le § suivant développe ce point important.

Quelles incidences peut-on attendre de la diffusion des VTH tournesol (et bientôt colza) sur l'utilisation d'herbicides au niveau de l'ensemble de l'exploitation ?

Actuellement, la majorité des superficies des céréales à pailles entrant en rotation avec le tournesol (et le colza) sont désherbées avec des herbicides inhibiteurs de l'ALS (sulfonylurées, triazopyrimidines, imidazolinones, ...). Comme évoqué précédemment, l'une des craintes essentielles concernant la diffusion des VTH Tournesol et colza est leur contribution à la réduction de l'efficacité de familles d'herbicides qui s'utilisent à de très faibles doses par hectare

²² L'étude sur les causes possibles du ralentissement du progrès agronomique en colza d'hiver et en tournesol présentée le 5 mai 2010 à l'Académie d'Agriculture par Frédéric Salvi et André Pouzé (CETIOM) met en évidence que, malgré la poursuite du progrès génétique variétal en tournesol (+ 0,47 q./ha/an dans les essais variétaux de 1988 à 2001), l'augmentation des rendements régionaux est nettement plus réduite. Les causes de cette quasi-stagnation sont multiples mais, parmi elles, figure la durée des rotations (Cf. Enquêtes « pratiques culturales tournesol réalisées par D. WAGNER de 2004 à 2010 montrant que, certaines années, près de la moitié des tournesols français sont cultivés en rotation biennale, ce qui est défavorable sur le plan du développement des adventices et de certaines maladies fongiques).

²³ Etude publiée en Janvier 2013 et coordonnée par Jean-Marc Meynard et Antoine Messéan. Elle a été réalisée par Aude Charlier, François Charrier, M'hann Fares, Marianne Le Bail et Marie-Benoît Magrini.

et qui ont des profils toxicologiques souvent plus favorables que la majorité des autres herbicides.

Cette crainte a heureusement été prise en compte par de nombreux organismes dont le CETIOM, Arvalis, etc. Cependant, pour éviter cette réduction d'efficacité des herbicides inhibiteurs de l'ALS, ces organismes conseillent de réduire leur utilisation sur céréales à paille et d'utiliser des herbicides souvent plus anciens...

Ainsi, sans référence à la toxicité de ces herbicides ni à la pollution des eaux des bassins versants concernés, il est préconisé d'utiliser sur les céréales à paille des matières actives du « domaine public » et qui s'utilisent avec un grammage élevé à l'hectare comme l'isoproturon et le chlortoluron, matières actives que l'on retrouve déjà trop fréquemment à d'importantes concentrations dans les eaux et qui sont classées C3 (présomption d'être cancérigène)²⁴. Toujours sur céréales à paille, il est également préconisé des matières actives spécifiquement antidicotylédones de type bromoxynil et/ou oxynil dont le profil toxicologique est également reconnu de longue date comme assez inquiétant²⁵.

Il nous paraît évident que ces préconisations ne vont pas favoriser la qualité des eaux et l'atteinte des objectifs d'Ecophyto 2018... Et, en essayant de se simplifier la tâche pour le désherbage du tournesol, on risque d'aboutir à une régression en terme de qualité environnementale pour les céréales à paille et d'autres grandes cultures...

Quelle incidence des VTH sur les repousses de tournesol ?

Les graines de tournesol (et encore plus de colza) peuvent survivre plusieurs années dans les sols. Les pertes à la récolte sont toujours significatives et correspondent à plusieurs fois les quantités de graines utilisées lors des semis. Lorsque les conditions sont favorables pour la levée de leur dormance, ces graines germent et deviennent des repousses qui se comportent comme des adventices pour les cultures en place.

En fonction de la génétique des lignées parentales utilisées pour la construction des variétés de tournesol (qui sont toutes des hybrides F1 en France), ces repousses présentent des phénotypes divers avec parfois des plantes très hautes ayant plusieurs capitules.

On trouverait également dans 15% de nos parcelles de tournesol des plantes multi-capitées d'*Helianthus* qui sont clairement différentes des repousses de tournesol dues à la perte des graines lors de la récolte. Ces plantes possèderaient trop de caractères des plantes sauvages pour être du tournesol dé-domestiqué²⁶. Ces populations pourraient

proliférer si elles introgressaient un gène de tolérance à un herbicide (Muller et al., 2009 et 2010²⁷).

En général, les repousses de tournesol (et tournesols sauvages) ne sont pas dommageables aux cultures d'hiver mais elles peuvent constituer une concurrence redoutable pour des cultures de printemps et d'été, en particulier pour les tournesols cultivés, le maïs, etc...²⁸ Lorsque les rotations sont trop courtes avec des tournesols revenant tous les 2 ou 3 ans, ces repousses sont souvent nombreuses dans les parcelles de tournesol de l'année. Elles concurrencent la variété de tournesol cultivée et, comme leur productivité est plus faible²⁹, diminuent le rendement global de la parcelle. Vu leur nombre, il est peu réaliste de vouloir les détruire manuellement (cela peut demander plus d'une journée de travail à l'hectare même après avoir réalisé un binage entre les rangs).

Plusieurs pratiques agronomiques peuvent contribuer à réduire le problème constitué par ces repousses de tournesol comme, par exemple : (1) réaliser le semis du blé après un travail superficiel de la parcelle de tournesol (éviter le labour qui enfouirait le stock de graines) ; (2) pour l'implantation du tournesol, réaliser au printemps un faux semis et décaler la date de semis. Cette seconde préconisation peut cependant être risquée dans les zones ayant fréquemment un printemps peu arrosé. En effet, semer plus tard accroît la probabilité de rater le bon épisode pluvieux et d'avoir ensuite des levées trop tardives et irrégulières du tournesol avec, au final, un rendement pénalisé.

La commercialisation des tournesols VTH change en partie la donne. Dans un premier temps, les herbicides préconisés pour ces VTH (Pulsar 40, Express SX) vont permettre de détruire les repousses de tournesol issues des pertes de récolte des cultures antérieures. Cela constitue indéniablement une solution facilitant le désherbage des agriculteurs ayant des rotations très courtes (Cf. § II.2).

Ensuite, le problème va se complexifier car les repousses issues de parcelles VTH seront résistantes aux herbicides inhibiteurs de l'ALS, que ce soit dans les parcelles de tournesol ou les cultures suivantes désherbées avec ce type d'herbicide... Le choix des herbicides deviendra en conséquence plus complexe à gérer et il demandera une connaissance précise de l'historique de chaque parcelle, des variétés et herbicides utilisés, etc. Et nous répétons qu'il est assez illusoire d'espérer que les agriculteurs détruisent manuellement ou mécaniquement dans leurs parcelles toutes les repousses des tournesols VTH des années antérieures !

Quelles conséquences au niveau territorial, en particulier pour les parcelles d'agriculteurs voisins n'utilisant pas de tournesol VTH ?

Le tournesol (et le colza) est une plante en partie allogame et, de plus, très visitée par les insectes lorsqu'il est en florai-

²⁴ Selon le site internet Agritox et l'index ACTA, l'isoproturon fait partie de la catégorie C3 de la classe CMR. Des effets cancérigènes sont suspectés et, dans une étude de 2 ans sur le rat, des tumeurs au foie ont été relevées.

²⁵ Voici ci-dessous le classement toxicologique et les phrases de risque d'un herbicide céréales à paille contenant 80 g/l de diflufenicanil, 120 g/l de bromoxynil phénol, 120 g/l de ioxynil phénol : Xn Nocif - N Dangereux pour l'environnement - Phrase(s) de Risques : R20/22 : Nocif par inhalation et en cas d'ingestion ; R36 : Irritant pour les yeux ; R48/22 : Risque d'effets graves pour la santé en cas d'exposition prolongée par ingestion ; R63 : Risque possible pendant la grossesse d'effets néfastes pour l'enfant ; R50/53 : Très toxique pour les organismes aquatiques et peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement aquatique.

Un tel herbicide est sans état d'âme présenté comme une alternative aux sulfonyles inhibiteurs de l'ALS !

²⁶ Ces plantes multi-capitées seraient issues de croisements avec des apparentés sauvages lors des phases de multiplication des semences en saison décalée en Amérique du Sud. Elles se reproduisent maintenant en toute autonomie en Europe du Sud.

²⁷ « Les tournesols adventices : un exemple d'évolution d'une mauvaise-herbe apparentée à une espèce cultivée – Synthèse des recherches menées sur les populations adventices de tournesol en France depuis 2004 » - Marie-Hélène Muller - Marie Roumet - Vincent Lecomte - INRA UMR AGAP. OCL 2012 ; 19(5) : 304-312. doi : 0.1684/ocl.2012.0465.

²⁸ Nous avons cultivé du chanvre porte graines pendant une vingtaine d'années, culture souvent insérée dans une rotation quadriennale : Tournesol-blé-chanvre-blé. Très peu d'herbicides antidicotylédones sont utilisables sur le chanvre (et leur profil toxicologique est préoccupant). Après 2 binages, nous passions souvent de nombreuses heures à l'hectare pour détruire manuellement les tournesols restants sur la ligne de chanvre.

²⁹ Les variétés de tournesol cultivées en France sont des hybrides F1. Leur descendance exprime les caractères des lignées parentales qui sont le plus souvent moins productives et plus fragiles que l'hybride lui-même.

son. Via le transport des pollens des tournesols VTH (et des colzas VTH) mais aussi via la dissémination des graines par le matériel de récolte géré en groupe ou appartenant à des entrepreneurs³⁰, une diffusion du ou des gènes de résistances aux inhibiteurs de l'ALS dans des parcelles de tournesol non VTH semble inéluctable.

La diffusion par croisements ne doit pas être minimisée pour le tournesol. Comme l'indique le règlement établi par le GNIS pour la production de semences de tournesol³¹, l'isolement de la parcelle par rapport à toute autre culture de tournesol est particulièrement important et est fonction de la catégorie de semences à produire : Semences de prébase : 5.000 m ; Semences de base : 3.000 m ; Semences certifiées : 500 m.

Vu cette diffusion génique, il semble inéluctable que des agriculteurs ne souhaitant pas utiliser de variétés de tournesol tolérantes à des herbicides se retrouveront au bout de quelques années avec des repousses résistantes aux herbicides inhibiteurs de l'ALS dans leurs parcelles... Et cela pourrait entraîner chez eux de mauvaises surprises (inefficacité de certains des herbicides qu'ils utilisent) puis de possibles contraintes et d'éventuels surcoûts pour leurs propres désherbages³². Qui prendra en charge ces surcoûts ?

Le « plan VTH » et sa charte des « bonnes pratiques » pourront-ils résoudre les problèmes identifiés ?

L'expertise scientifique collective CNRS-INRA (ESCo)³³ mentionne que « L'introduction de VTH dans une rotation pourrait plutôt avoir pour conséquence un moindre recours aux méthodes non chimiques, voire une simplification ou un abandon du désherbage mécanique » (voir sections 3.1.3 et 3.1.4 du rapport principal) ».

Elle détaille également les risques liés à l'introduction des VTH :

- 1) « Contribuer à l'extension de la résistance chez les espèces où elle a déjà évolué ;
- 2) Augmenter la pression de sélection sur les espèces déjà ciblées par ce mode d'action mais qui n'ont pas encore développé de résistance ;
- 3) Du fait de l'élargissement de l'usage à de nouvelles cultures, étendre la pression de sélection à de nouvelles espèces cibles (espèces de la flore du colza et du tournesol) ».

Cette expertise conclut cependant de façon assez optimiste « que les VTH peuvent contribuer à la diminution de l'usage des herbicides dès lors que leur recours est associé à des mesures d'accompagnement » s'appuyant « sur la mise en œuvre d'un raisonnement global de la stratégie de désherbage dans le temps et dans l'espace », tout en soulignant

que « l'usage inapproprié de cette technologie peut favoriser l'apparition de flores adventices résistantes (...) ».

Cette expertise souligne au final la nécessité « d'élaborer un plan d'accompagnement de l'utilisation des VTH encadré à travers le dispositif de suivi post-AMM figurant dans le projet de loi d'avenir pour l'agriculture ». Un plan d'accompagnement a en conséquence été conçu en fin 2012 par le CETIOM, ARVALIS, UIPP, UFS, FNA et Coop de France. Il comporte une « charte de bonnes pratiques » pour la gestion du désherbage des cultures dans des rotations comprenant des VTH. L'extrait ci-après de cette charte précise son objectif, les organismes impliqués et les deux types de comité créés.

L'introduction de variétés de colza et de tournesol tolérantes aux herbicides (ci-après « VTH ») dans la rotation permet un meilleur raisonnement du désherbage en post-levée des cultures et une diversification des moyens de lutte en préservant les solutions classiques de prélevées. Pour assurer une utilisation durable de ces techniques, certains facteurs doivent être maîtrisés et font l'objet d'un plan concerté d'accompagnement à la mise en marché de ces VTH. Ce plan d'accompagnement VTH est piloté par un comité de suivi, présidé par la DGAL, et composé de représentants de l'UFS, l'UIPP, de Coop de France, de la FNA, des instituts techniques des grandes cultures, du Ministère de l'Ecologie, du développement durable et de l'énergie, et de l'Inra. Par ailleurs, un comité technique animé par le CETIOM composé de membres de l'UFS, de l'UIPP, de Coop de France, de la FNA, des instituts techniques des grandes cultures sera constitué, ayant pour mission de valider les choix techniques à mettre en œuvre pour la réalisation du plan.

Informations complémentaires concernant cette charte :

- 1) Dans les modalités de cette charte, il est précisé qu'un contrat doit être établi entre le détenteur et le distributeur de la variété VTH et de son herbicide associé. Par contre, la charte indique qu'il n'y aura pas de contrat impliquant les agriculteurs utilisant les VTH.
- 2) Dans ce contrat, les distributeurs s'engagent à fournir un conseil aux agriculteurs auxquels ils ont vendu des VTH en se basant sur les recommandations du comité technique du plan VTH, lesquelles s'inspirent de celles du CETIOM³⁴. Toutefois, il ne s'agit que de conseils. Aucune contrainte n'est de fait exercée sur l'agriculteur et celui-ci est libre d'implanter des VTH sur des parcelles de son choix sans prendre en compte les risques de pollution génique des parcelles de tournesol de ses voisins ni les incidences territoriales.

Lors de leurs enquêtes réalisées dans le cadre de leur étude sur les tournesols adventices, Marie-Hélène Muller (cf. étude

³⁰ La coupe à tournesol d'une moissonneuse batteuse transporte des milliers de graines d'une parcelle à l'autre. Et la nettoyer complètement demande du temps et n'est donc que très rarement effectué. La trémie de cette même moissonneuse n'est pas non plus complètement nettoyée d'une parcelle à l'autre. Pour certaines marques, ce qui reste après la vidange dans la trémie correspond à quelques dizaines de kilogrammes de graines !

³¹ Cf. règlement technique annexe de la production, du contrôle et de la certification des semences de tournesol - Règlement homologué par arrêté du 19 septembre 2008 et paru au JO du 1er octobre 2008.

³² Ces mésaventures ne concerneraient pas a priori les agriculteurs bios qui n'utilisent pas d'herbicides.

³³ Cf. site : <http://institut.inra.fr/Missions/Eclairer-les-decisions/Expertises/Toutes-les-actualites/Expertise-Varietes-vegetales-tolerantes-aux-herbicides>.

³⁴ Pour limiter le transfert de la tolérance herbicide aux formes adventices et ainsi préserver un bon niveau d'efficacité de cette technique, le CETIOM (Duroueix, Leflon, 2009) a mis en avant des mesures d'accompagnement et a insisté auprès des professionnels sur l'importance de leur strict respect :

- Ne laisser aucune zone non traitée dans la parcelle en culture ;
- À la floraison du tournesol cultivé, détruire les tournesols adventices restant dans la parcelle et ceux éventuellement présents dans les zones jouxtant la parcelle (bandes enherbées, coins de parcelles) ;
- Éviter les situations où les parcelles cultivées en tournesols tolérants aux herbicides jouxtent des parcelles cultivées en tournesol classique, infestées, même faiblement, par des tournesols adventices.

Pour conseiller les agriculteurs et les aider à évaluer leurs pratiques de désherbage au niveau de leurs rotations, le CETIOM a également mis au point un outil en ligne, R-SIM, disponible sur son site depuis le printemps 2013.

précitée) mentionne : « Des suivis réalisés en 2010 chez les agriculteurs exposés aux tournesols adventices ont montré que les mesures préconisées n'étaient encore pas assez prises en compte. Nous avons en particulier observé des bosquets de tournesols adventices en fleur en bordure ou au sein (zones non traitées avec l'herbicide) d'une parcelle cultivée avec un tournesol tolérant (= VTH). La sensibilisation doit donc être poursuivie dans la durée afin d'éviter des transferts de la tolérance herbicide vers le tournesol adventice : pour un agriculteur ne suivant pas les conseils de lutte durable, la parcelle se retrouverait au bout de seulement deux ans (cas d'une rotation courte tournesol - blé) en présence de tournesols adventices tolérants à l'herbicide ».

« De façon plus générale, l'enseignement de la biologie évolutive est que le système est dynamique : la mise en œuvre d'une méthode de lutte est susceptible d'entraîner une réponse évolutive de la mauvaise herbe, lui permettant d'échapper à cette méthode de lutte. La réponse sera plus ou moins rapide en fonction de la méthode (intensité de la pression de sélection), et des caractéristiques des populations (taille, diversité génétique pour les caractères impliqués dans la réponse, importance des flux géniques, Neve et al., 2009) ».

Vu ce qui précède, nous ne croyons pas à un plan VTH qui n'engage pas contractuellement les agriculteurs utilisant ce type de variété.

Conclusion et suggestions

Les guides de culture tournesol 2013 et 2014 du CETIOM précisent que les VTH et herbicides de post levée associés sont surtout justifiés pour les flores difficiles type ambroisie, bidens, chardon, datura, liseron des haies, tournesol sauvage et xanthium.

Or, en 2013, le tiers des superficies de tournesol a été semé en VTH. Des superficies aussi importantes de tournesol ont-elles été en 2013 concernées par des flores difficiles ? Nous en doutons fortement et croyons plutôt que la solution de confort au niveau parcelle et filière a primé sur les approches globales au niveau système de culture, exploitation et territoire ou, exprimé différemment, que les intérêts économiques à court terme ont de nouveau primé sur les intérêts individuels et collectifs à moyen et long terme.

Comme expliqué dans cet article, cette extension des VTH a de très fortes probabilités d'être incompatible avec le plan Ecophyto 2018 qui espérait atteindre une réduction de moitié de l'usage des pesticides de 2008 à 2018.

Nous la jugeons également défavorable à une évolution des systèmes de culture français vers l'agroécologie.

Quelques suggestions :

- Il paraît urgent de réaliser une évaluation en toute neutralité du plan VTH, en particulier de la pertinence des conseils aux agriculteurs réalisés dans ce cadre et de leur mise en œuvre ou non par ces agriculteurs lors de la campagne 2013.

- L'outil R-SIM géré par le CETIOM est surtout un outil post-décision d'utiliser des variétés VTH. Il manque à notre avis un outil agronomique robuste permettant d'évaluer en

amont l'opportunité d'utiliser telle ou telle variété VTH comme un recours ultime dans les cas difficiles et compliqués d'infestation par des adventices reconnues comme particulièrement nuisibles.

- Parallèlement, un contrat engageant de façon précise les agriculteurs souhaitant cultiver des VTH tournesol devrait être conçu et mis en place dès la prochaine campagne agricole. Ce contrat devrait être accompagné d'un contrôle externe et neutre des moyens et des résultats obtenus.

Si l'évaluation rigoureuse du plan VTH tournesol n'est pas réalisée à temps, un moratoire devrait être instauré pour les VTH colza susceptibles d'être semées à l'automne 2015, les risques de pollution génique et de dissémination de graines au moment de la récolte étant extrêmement importants pour cette crucifère.

Annexe 1 : Classement toxicologique et brèves informations sur les herbicides utilisés dans les itinéraires tournesols classiques et tournesols VTH (source : Index ACTA 2013)

Légende des « phrases de risque » mentionnées ci-dessous pour chacun des produits :

- Xi = Irritant - Xn = Nocif - N = Dangereux pour l'environnement
- R41 = Provoque des lésions oculaires graves
- R43 = Peut provoquer une allergie cutanée
- R50/53 = Très toxique pour les organismes aquatiques
- R52/53 = Nocif pour les organismes aquatiques
- R62 = Risque possible d'altération de la fertilité
- R63 = Risque possible pendant la grossesse d'effets néfastes pour l'enfant

Pulsar 40 - Matière active = Imazamox – 40g/l.
Inhibe l'enzyme AHAS - Préconisation BASF = 1,25 l./ha
Toxicité : DL 50 orale rat > 5000mg/kg - Classement : N - R50/53 - Zone non traitée (ZNT) = 5 m.
Utilisé sur luzerne, féverole, pois, lentille et soja et tournesol tolérants.

Express SX - Matière active = Tribénuron-Méthyle - 50 %
Inhibe l'enzyme ALS - Préconisation Dupont = 40g/ha
Toxicité : DL 50 > 5000mg/kg - Classement : Xi - N - R43 - R50/53 - Zone non traitée = 5 m.
Utilisé sur céréales à paille et sur tournesol VTH.

Trend 90 - Matière active = Alcool isodécylique - 0,1 l/hl en complément d'Express SX
Trend est un mouillant utilisé pour accroître l'action d'Express SX
Toxicité : Xn - R22 - R41 - R52/53.

Ces 3 matières actives sont utilisées en post-levée sur des tournesols VTH spécifiques. Selon les préconisations du CETIOM (cf. guides culture tournesol 2013 et 2014), les produits utilisables avant semis sont ceux des tournesols non VTH avec, dans certains cas, une réduction de dose.

Quelques caractéristiques de ces produits de prélevée sont mentionnés ci-après :

Challenge 600 - Homologué à 3,5 l/ha - Matière active : aclo-nifen - 600g/l
Toxicité : DL 50 > 5000mg/kg - Classement : N - R50/53 - Zone non traitée = 5 m.

Prowl 400 - Homologué à 3,3 l/ha - Matière active : Pendimé-thaline
DL 50 > 5000mg/kg - Classement : N - R50/53 - **Zone non traitée = 20 m.**

Racer ME - Homologué à 2 l/ha - Matière active : flurochlori-done - 250g par l
Toxicité : DL 50 = 4000mg/kg - Classement : Xn - N - R50/53 - **R62** - Zone non traitée = 5 m

Utilisé sur tournesol, pois, tomate, ...

Novall - Homologué à 1,5 à 2 l/ha - Matières actives : quimé-rac 100g/l. + métazachlore 400g/l
Toxicité quimérac : DL 50 > 5000mg/kg - Classement : R52/53
Toxicité métazachlore : DL 50 = 2150mg/kg - Classement : Xi - N - **R43** - R52/53 - Zone non traitée = 5 m
Toxicité du produit commercial : Classement : Xi - N - R43 - R52/53.

Mercantor Gold - Homologué à 1,2 à 1,4 l/ha - Matière active : S-Métolachlore 960g/l
Toxicité : > 2000 mg/l. - Classement : Xi - N - **R43** - R52/53 - Zone non traitée = 5 m.

Nikeyl ou Cline - Homologué à 4 l/ha - Matières actives : aclonifen - 350g/l. + flurtamone - 94g/l
Toxicité aclonifen : DL 50 > 5000mg/kg - Classement : N - R50/53
Toxicité flurtamone : DL 50 > 5000mg/kg - Classement : N - R50/53
Toxicité du produit commercial : N - R50/53 - **Zone non traitée = 20 m.**

Carioca - 4 l/ha - Matières actives : aclonifen - 500g/l. + oxa-diargyl - 37,5g/l
Toxicité aclonifen : DL 50 > 5000mg/kg - Classement : N - R50/53
Toxicité oxadiargyl : DL 50 > 5000mg/kg - DL 50 > 5000mg/kg - Classement : Xn - N - 548/22 - R50/53 - **R63 (R3)** - Toxicité produit commercial : N - R50/53 - Zone non traitée (ZNT) = 50 m

Annexe 2 : Liste des principaux sigles utilisés dans cet article

ALS :	Enzyme acétolactate synthase
ARVALIS :	Institut du végétal
CETIOM :	Centre interprofessionnel des oléagineux et du chanvre
COV :	Certificat d'obtention végétale
FNA :	Fédération du négoce agricole
IFT :	Indicateur de fréquence de traitement
InVIVO :	Premier groupe coopératif français (241 coopératives associées)
UFS :	Union française des semenciers
UIPP :	Union des industries de la protection des plantes
VTH :	Variétés tolérantes à des herbicides

Les variétés de soja tolérantes aux herbicides, moteur de la spécialisation agricole dans la région pampéenne argentine

The soybean varieties tolerant to herbicides, driving force of the agricultural specialization in the Argentinean Pampa

Chloé SALAMBIER^{1*} - Susana GROSSO²
Jean-Marc MEYNARD³

¹INRA Unité Expérimentale Alénya Roussillon - Domaine du Mas Blanc - 66200 Alénya

²UNL - Faculté de Ciencias Agrarias - Esperanza (S. Fe)

Argentine

³INRA Département Sciences pour l'Action et le Développement (SAD) - Bâtiment EGER - Campus de Grignon - F78850 Thiverval-Grignon

*Auteur correspondant : chloe.salembier@supagro.inra.fr

Résumé

Après une vague de conversion de nombreuses parcelles d'élevage extensif en grande culture au cours du XX^e siècle, la production pampéenne se spécialise sur la culture du soja dans les années 1990. Cette période correspond à la mise sur le marché d'un nouveau type variétal de soja tolérant à un herbicide, le glyphosate : le soja RoundUp Ready. Associée au glyphosate et à la pratique du semis direct, la culture du soja est alors très rentable, techniquement très simple et peu risquée. De nombreuses exploitations l'intègrent ou se spécialisent dans cette production. La multiplication des surfaces en soja n'est pas sans impacts sur l'environnement et bouleverse complètement l'organisation des territoires ruraux argentins. Comprendre cette spécialisation agricole et pouvoir la comparer à celle d'autres régions (ex : la « céréalisation » dans le bassin parisien) implique de réfléchir aux conditions qui ont permis son développement, qui en Argentine, résultent d'une libéralisation de l'économie, d'une absence de réglementation de l'accès au foncier, de la mise en œuvre de politiques publiques propices à la spécialisation agricole et de l'évolution des marchés mondiaux.

Mots-clés

Monoculture, Pampa argentine, semis direct, soja RoundUp Ready, spécialisation agricole.

Abstract

After a wave of conversion of many fields from extensive cattle farming to cereals or oleaginous crops, in the 90's, the production of the Pampa got specialized on soybean. This period corresponds to the integration on the market of a new soybean variety resistant to herbicides: the RoundUp Ready soybean. Associated to the use of glyphosate and to the direct sowing practice, soybean production becomes very profitable, technically easy to manage and presents few productive risks (market, climate, pests). Regarding these advantages, a lot

of farms integrate this culture in their production range and some get specialized on soybean production. The increasing development of areas dedicated to this crop has negative impacts on the environment (homogeneity of landscapes, sanitation risks, ground degradation...) and affects the organization of the rural territories. This paper aims to highlight the understanding of the process of

agricultural specialization of the Pampas and compare it to the agricultural specialization happening in other regions (eg: the specialization on cereals in the Paris Basin), presenting some of the conditions that allowed its development. Some of these conditions lie on the Argentinean economical liberalization, the property/renting deregulation, the development of agricultural policies reinforcing the specialization and on the trends of global markets.

Key-words

Monoculture, Argentinean Pampas, direct sowing, RoundUp Ready soybean, agricultural specialization.

Durant les dernières décennies, une profonde révolution agricole a transformé et spécialisé les territoires de la région pampéenne (Albaladejo, 2011). Les systèmes de production mixtes ou basés sur l'élevage extensif ont petit à petit cédé la place à des exploitations en polyculture ou en monoculture de céréales ou oléo-protéagineux. L'évolution des marchés mondiaux, la libéralisation de l'économie, la réglementation argentine actuelle, l'orientation de la R&D agricole et les nouvelles technologies ont permis et renforcé ce qui est aujourd'hui appelé le processus d'*Agriculturalización* de la région pampéenne.

L'*Agriculturalización* de la région pampéenne, définie comme « un usage croissant et continu des surfaces occupées par les grandes cultures au détriment de l'élevage » (Manuel Navarrete et al., 2005), s'accompagne de l'émergence de nouvelles pratiques agricoles, dans lesquelles, dès les années 1980, le semis direct occupe une place croissante. Cette révolution agricole prend un nouveau tournant à partir des années 1990, avec la mise sur le marché de variétés de soja tolérantes au glyphosate : le soja RoundUp Ready (RR). Suite à l'arrivée de cette nouvelle technologie, l'*agriculturalización* se spécialise dans la production de soja, on parle alors de la *sojización* de la région pampéenne. Ce nouveau type variétal, associé dans un « paquet technologique » au glyphosate et au semis direct, a rapidement été adopté par de nombreux producteurs, certains se spécialisant même dans cette production (les figures 1 et 2 illustrent l'ampleur de ce phénomène).

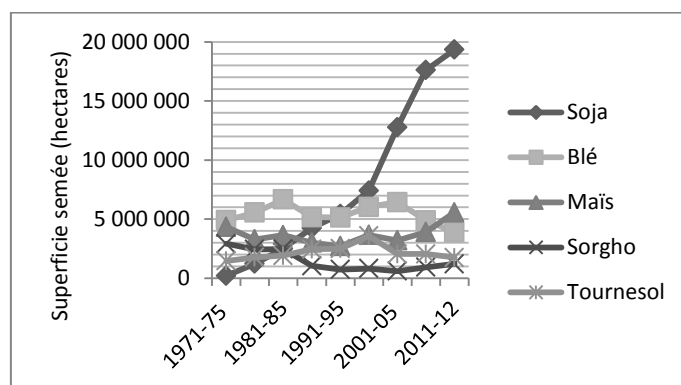


Figure 1 - Évolution des surfaces occupées par les grandes cultures en Argentine de 1971 à 2012 (d'après SAGPyA)

Figure 1: Evolution of the areas dedicated to cereals and oleaginous in Argentina from 1971 to 2012 (from SAGPyA)

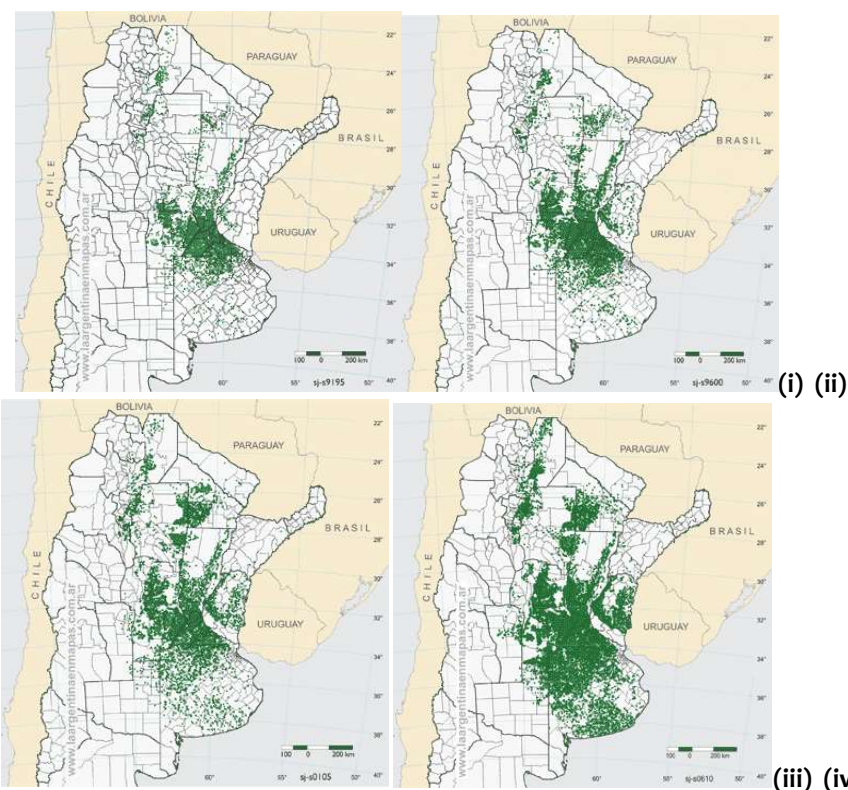


Figure 2 : Évolution des surfaces occupées par la culture du soja de (i) 1991 à 1995, (ii) 1996 à 2000, (iii) 2001 à 2005 et (iv) 2006 à 2010 (<http://www.laargentinaenmapas.com.ar/>, consultation 01/2015 (IMHICIHU-CONICET))

Figure 2 : Evolution of the areas dedicated to soybean from (i) 1991 to 1995, (ii) 1996 to 2000, (iii) 2001 to 2005 and (iv) 2006 to 2010 (<http://www.laargentinaenmapas.com.ar/>, consultation 01/2015 (IMHICIHU-CONICET))

Cet article se propose de présenter la manière dont le développement d'un nouveau type variétal, le soja RoundUp Ready, a contribué à une évolution profonde des systèmes de culture de la région pampéenne et, par ricochet, a participé à un bouleversement économique et social de l'agriculture et des territoires ruraux argentins. Nous concluons en comparant le processus de spécialisation agricole en région pampéenne à la spécialisation agricole à l'œuvre dans le bassin parisien.

La cohérence agronomique et les impacts des systèmes de culture ultra simplifiés à base de soja

Les raisons du succès du paquet technologique « soja RoundUp Ready, glyphosate, semis direct »

Les promoteurs du paquet technologique mettent en avant de nombreux avantages économiques, organisationnels et agronomiques à l'association des trois composantes : soja RoundUp Ready, glyphosate et semis direct.

Le soja, une légumineuse particulièrement appréciée pour sa plasticité, s'adapte à des environnements aux disponibilités en eau et nutriments variables (Andrade et Sadras, 2002) et présente peu de problèmes sanitaires susceptibles d'entraîner de fortes chutes de production. Des variétés de soja de précocité et durées de cycle très différentes sont aujourd'hui disponibles et permettent une mise en culture sous différentes latitudes et après différents précédents culturaux. Le soja peut être cultivé (i) en cycle long (culture principale, semée au printemps et récoltée à l'automne) ; (ii) en dérobé (semé juste après un blé, une orge, un colza), le précédent cultural impacte le rendement du soja dérobé dans la mesure où chaque jour de retard dans la date de

semis réduit le rendement potentiel (Monzon et al., 2006), (iii) voire en association avec une céréale (cas du blé ; Caviglia et al., 2004).

L'introgession dans la plante d'un transgène « RoundUp Ready » lui permet d'acquérir une résistance au principe actif du glyphosate (N-fosfonométhyl glycine), un herbicide systémique non sélectif et de large spectre. Le glyphosate remplace le travail du sol ou les « cocktails d'herbicides » pour le contrôle des adventices (Ménard, 2014), ce qui limite les coûts (le travail du sol est coûteux en carburant et main d'œuvre), réduisant la consommation d'énergie fossile et les émissions de gaz à effet de serre, ce qui offre aux promoteurs du paquet technologique un argument de poids, relatif à la réduction des nuisances environnementales.

La pratique du semis direct conduit à diminuer le temps de travail passé à l'implantation d'une culture (Gonzales Montaner, 2002). D'un point de vue agronomique, cette pratique permet (i) le maintien d'une couverture du sol par un mulch de résidus de la culture précédente, limitant l'évaporation, améliorant ainsi le bilan hydrique, essentiel pour une culture d'été comme le soja, (ii) de limiter les phénomènes d'érosion en présence de résidus de culture (en terrains pentus ou présentant une mauvaise structure du sol). Elle permet aussi (iii) de limiter les effets de la dégradation physico-chimique du sol et ainsi de mettre en culture des zones de faible aptitude agricole initialement non cultivées (sols sablonneux ou peu profonds), et (iv) d'augmenter par la présence des résidus la biomasse microbienne et la micro et méso faune du sol (Alvarez et Mulin, 2004).

Dans le contexte pédoclimatique favorable de la région pampéenne (sols riches en matière organique, climat tempéré), combiner ce paquet technologique « soja RR, glypho-

sate, semis direct » à des apports en intrants visant à éviter stress nutritionnels ou sanitaires, assure régulièrement au producteur l'atteinte de rendements annuels satisfaisants (de 3 à 3,5t/ha pour un soja de cycle long). À court terme, le risque pour le producteur apparaît limité, d'autant que le marché international du soja est en pleine expansion (environ 530\$/ha pour un soja de cycle long à 3,5t/ha - campagne 2010-11).

L'exemple des systèmes de culture spécialisés dans le sud-est de la province de Buenos Aires

Le phénomène de *sojización* est parfois présenté comme un processus de diffusion du paquet technologique qui serait intégré de manière homogène dans les exploitations, mais en réalité cette diffusion fut disparate en Argentine. Dans le nord de la région pampéenne (*zona del núcleo agrícola*), les surfaces initialement occupées par une diversité de céréales et oléagineux ont petit à petit été remplacées par des monocultures de soja dans de nombreuses exploitations. Le sud-est de la province de Buenos Aires, dans laquelle se trouvaient historiquement des systèmes de production plus diversifiés (culture de la pomme de terre, fermes de polyculture-élevage...), a été investi de manière moins radicale par ce processus. Le système de culture le plus fréquent qui occupe aujourd'hui une grande partie des surfaces cultivables (système dit « dominant » dans la suite de l'article), est caractérisé par une rotation de trois cultures sur deux ans : soja de cycle long la première année (de novembre à mai), une céréale la deuxième année (blé ou orge) suivie la même année d'une culture dérobée de soja de cycle court (de fin décembre-début janvier à mai-juin). Ce système de culture est relativement intensif en intrants. Ainsi, chaque semis de soja de cycle long et de blé (ou orge) est précédé d'une « jachère chimique » durant laquelle sont appliqués 3 traitements herbicide (deux glyphosates et un 2,4D) en quelques mois. Cette pratique, largement répandue dans la région pampéenne, a vocation à limiter la pression adventice avant les semis. En cours de cycle de la céréale, une à deux applications d'herbicides sont réalisées, et une application de fongicide systématique (lutte contre la rouille, le piétin, la septoriose...).

La conduite du soja de cycle long comprend une application préventive de leurres hormonaux (contre cloportes et limaces, favorisés par le mulch permanent à la surface du sol), un insecticide (cyperméthrine – lutte contre des chenilles phytophages), et trois applications d'herbicides en cours de cycle (deux applications de glyphosate et une de 2,4DB). Sur le soja de cycle court, seules trois applications de glyphosate sont systématiquement réalisées en cours de cycle. Le soja n'est fertilisé qu'en culture de cycle long, le soja de cycle court bénéficiant des résidus de fertilisation de la céréale qui le précède.

Les producteurs ayant adopté ce système soulignent qu'il leur convient parce qu'il permet de maximiser le retour sur investissement à court terme. Pour maintenir cette performance, la rotation peut le cas échéant être modifiée très rapidement. Le remplacement du blé par l'orge ces dernières années, face à la baisse du prix du blé en Argentine, liée aux restrictions d'exportation, révèle bien la souplesse

de réajustement de ce système qui évolue au gré des réglementations et du marché.

Dans le sud de la province de Buenos Aires, nous avons rencontré ce système de culture ultra simplifié dans différents types de structures de production : (i) dans des entreprises agricoles dont l'origine du capital investi est extérieure au monde agricole et dans lesquelles l'objectif est de maximiser à court terme le rendement du capital investi pour satisfaire les actionnaires ; (ii) dans les exploitations dont une partie des surfaces est louée et qui doivent assumer la couverture des coûts élevés de location de la terre ; (iii) enfin, dans les exploitations dont les producteurs disposent de peu de temps (doubles actifs pour qui l'activité agricole est secondaire) et choisissent alors ce système pour sa simplicité de mise en œuvre.

Les impacts environnementaux de ces systèmes de culture

Bien que ces systèmes de culture ultra simplifiés présentent des atouts économiques et organisationnels (moindre temps de travail et technicité requise) indéniables au niveau des producteurs, on trouve aujourd'hui dans la littérature et les discours de nombreux acteurs de la filière agricole argentine une remise en question de la « durabilité » de ces systèmes à l'échelle du territoire, tant sur le plan environnemental que social.

Le développement des monocultures ou quasi-monocultures engendre une homogénéisation des mosaïques paysagères, et ainsi une diminution de la diversité de la faune et de la flore locales et des services écosystémiques par disparition des variabilités d'habitats (Benton et al., 2003 ; Carreño et Viglizzo, 2010) : le soja, moteur du front pionnier « grande culture », a remplacé des zones préalablement couvertes de prairies permanentes ou pluriannuelles, et parfois de forêts (Viglizzo et al., 2010). La conversion d'espaces naturels ou semi-naturels en champs de céréales et oléagineux, associé à des itinéraires techniques intensifs en intrants, favorise les émissions de gaz à effets de serre (Carreño et al., 2010).

Au niveau du sol, les résidus de soja n'assurent pas un apport en matière organique conséquent et des études révèlent qu'à moyen terme en monoculture ou dès lors que le soja est très présent dans la rotation, les taux d'humus du sol diminuent, malgré la pratique du semis direct (Studdert et Echeverria, 2000 ; Studdert et al., 2009). Selon certains experts (chercheurs, conseillers, agriculteurs), la pratique répétée du semis direct sans recours au travail du sol peut engendrer, sur les sols les plus fragiles, des phénomènes de compaction qui ont des répercussions, à terme, sur les rendements. Et les observateurs soulignent que l'érosion n'est pas supprimée : le mulch n'est souvent pas suffisamment épais et réparti de manière homogène pour protéger efficacement les sols contre les départs de terre sous l'effet de pluies parfois violentes.

La pollution des sols et eaux souterraines par les pesticides ne fait pas l'objet d'un débat sociétal aussi vif en Argentine qu'en France, mais commence à être mise en évidence par la recherche (Viglizzo et Frank, 2010). L'usage répété (quatre fois par an en moyenne dans le système dominant) du glyphosate engendre le développement de résistances chez

certaines adventices (comme par exemple *Amarethum sp.*, *Avena fatua*, *Lolium sp.* ou encore *Sorghum Halepense sp ...*, <http://www.aapresid.org.ar/rem>). Ces adventices résistantes, qui deviennent impossibles à contrôler par le glyphosate malgré des augmentations de doses, amènent le producteur à recourir à l'usage d'herbicides complémentaires (Caviglia et al., 2004) - comme le 2,4D ou l'atrazine par exemple. Les figures 3 et 4, comparent ce système dominant avec des systèmes plus diversifiés de la même région, mais qui restent très minoritaires (Salembier et Meynard, 2013). Ces figures illustrent bien les limites d'un système basé sur une rotation ultra-simplifiée dans laquelle sont utilisées à répétition les mêmes matières actives : plus la fréquence de soja est importante dans la rotation de culture, plus l'usage de glyphosate est important et plus le risque de développement d'adventices résistantes croît.

Sur les figures 3 et 4, les points en forme de cercle, triangle ou losange sont des moyennes (ou une médiane dans le cas de la donnée qualitative « adventices résistantes ») pour plusieurs systèmes de culture ayant des logiques agronomiques très proches. Le point en croix représente le système de culture dominant du sud-est de la province de Buenos Aires. Les points en forme de cercle sont des systèmes présentant des rotations longues, de grande culture principalement (colza, blé, orge, tournesol, maïs, cultures fourragères annuelles, pomme de terre) ; le point en losange, des systèmes proches du système dominant, un peu plus diversifiés (maïs, tournesol), mais ayant néanmoins un recours intensif en intrants chimiques et le point en triangle, des systèmes de culture intégrant à la fois des cultures de diversification et une période de prairie pluriannuelle.

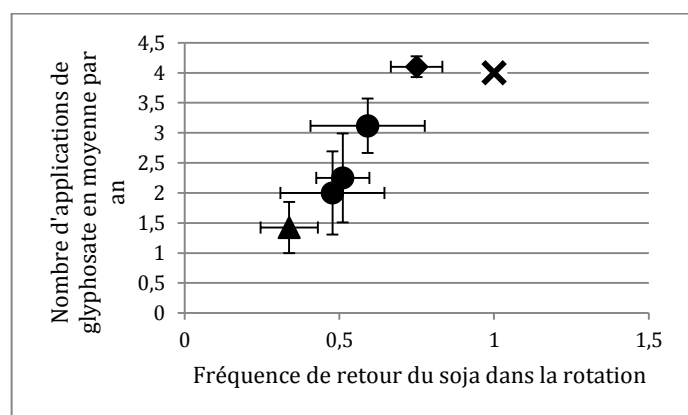


Figure 3: Répercussions sur l'usage de glyphosate de l'intégration fréquente de soja dans les rotations (d'après Salembier et Meynard, 2013)
Figure 3: Consequence of a frequent integration of soybean in rotations on glyphosate use (from Salembier and Meynard, 2013)

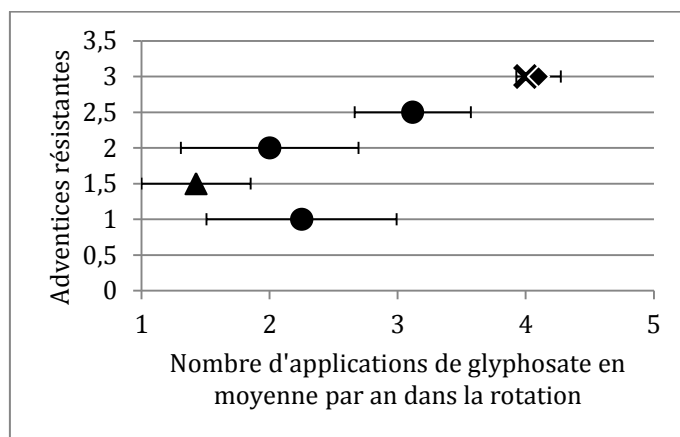


Figure 4 : Impacts du nombre moyen d'applications de glyphosate par an sur le développement d'adventices résistantes au glyphosate (d'après Salembier et Meynard, 2013). En ordonnée sur le graphique, la présence d'adventices résistantes est un indicateur qualitatif. Il est noté sur une échelle de 1 à 3 et exprime le degré de gravité du développement des résistances (1= aucune présence d'adventice résistante au glyphosate relevée par le producteur ; 2= présence d'adventices résistantes n'ayant pas impliqué de changement du programme de désherbage sur la parcelle ; 3= présence d'adventices résistantes et recours à l'usage d'herbicides complémentaires)

Figure 4: Impacts of glyphosate use on the development of weeds resistant to glyphosate (from Salembier and Meynard, 2013). On ordinate on the graphic, the presence of resistant weeds is a qualitative indicator. It is marked from 1 to 3 and express how grave is the development of resistant weeds (1= without any presence of weeds resistant to glyphosate noticed by the producer, 2= presence of resistant weeds that doesn't implicate any change on the weed management program, 3= presence of weeds resistant to glyphosate and use of additional herbicides to control them)

À l'échelle du territoire, l'homogénéisation des mosaïques paysagères est propice à une propagation rapide de pathogènes et ravageurs et augmente les risques sanitaires à grande échelle. Pour se prémunir contre ces problèmes, de nombreux producteurs optent pour des solutions chimiques préventives et systématiques contre les principaux bio agresseurs du soja. À l'échelle de la parcelle, le maintien d'un mulch sur le sol peut favoriser le développement de maladies et de ravageurs dont les plus nuisibles aujourd'hui sont le cloporte (*Armadillidium vulgare*, Latreille 1804) et la limace (*Arion hortensis*, Férussac 1819) (Garavano et al., 2011 ; Saluso et al., 2005).

Face aux risques sanitaires croissants, une partie de la R&D agricole continue ses investigations pour trouver des solutions, mais qui restent centrées sur des logiques de substitution, plus que de re-conception. L'une des dernières biotechnologies de Monsanto en est un bon exemple. L'entreprise a récemment mis sur le marché une nouvelle variété de soja « doublement-résistante », le soja INTACTA RR2 PRO, contenant les transgènes RoundUp Ready et *Bacillus thuringiensis* (Cry1AC). Cette variété est promue comme plus productive que le soja RoundUp Ready, et, en plus d'être tolérante au glyphosate, elle est aussi résistante aux attaques de différentes chenilles défoliatrices (*Anticarsia gemmatilis*, *Rachiplusia nu*, *Crociosema aporema...*).

Les transformations des structures de production et leurs impacts à l'échelle du territoire

Le processus de *sojización* a engendré non seulement une évolution des espèces cultivées et des pratiques agricoles, mais aussi une reconfiguration des organisations socio-

productives des exploitations, et une évolution des acteurs du secteur agricole : de nouveaux acteurs prennent part à l'activité productive alors que d'autres sont évincés.

Une transformation des modes de production et l'apparition de nouveaux acteurs dans la production agricole argentine

L'attractivité économique de ces systèmes de culture et la libéralisation économique en Argentine ont favorisé l'apparition de nouveaux acteurs dans le secteur agricole. Les « pools de culture » (Grosso, 2009 ; Guilbert et al., 2011) sont les nouvelles figures emblématiques de ce phénomène, ce sont des fonds d'investissement nationaux ou étrangers regroupant les capitaux nécessaires à la mise en culture du soja sur une campagne agricole. Inscrits dans une logique productive de rentabilité économique à court terme, certains répartissent les risques productifs (liés au climat) en investissant leurs capitaux dans différentes zones géographiques de la région pampéenne. Ces nouvelles entités mobilisent tous les avantages de ces nouveaux systèmes de production dans la situation politico-économique à l'œuvre : (i) ils louent des surfaces de plusieurs milliers d'hectares à des rentiers sur une ou deux campagnes pour y cultiver des grandes cultures, où le soja est majoritaire ; (ii) ils s'assurent les services de prestataires pour réaliser les tâches agricoles et n'emploient qu'un administrateur de champ réalisant le conseil et l'expertise technique de la production. Le nombre de ces prestataires de service (les *contratistas*) a crû avec le développement de ces nouveaux systèmes de production. Ces entrepreneurs possèdent en général l'ensemble du parc de machines nécessaires à la réalisation des tâches agricoles, ce sont souvent d'anciens producteurs ou fils de producteurs ayant délaissé l'activité agricole pour se concentrer sur la prestation de services, ou des producteurs possédant leurs machines et ayant une capacité opérative disponible.

Le foncier, facteur clé du développement de ces systèmes de culture

La gestion du foncier en Argentine est un facteur déterminant de l'expansion des systèmes de culture ultra simplifiés de la région pampéenne. Les baux de location peuvent être très courts, la réglementation offre la possibilité à un propriétaire de louer ses terres, pour une campagne agricole, à tout individu, issu ou non du secteur agricole. De grandes entreprises (dont les pools de culture) ayant des capitaux rapidement disponibles et en recherche d'extension peuvent ainsi cultiver de très grandes surfaces (d'au moins 10 000 ha) sur une ou deux campagnes. Cette concentration des terres agricoles a eu des impacts directs sur les prix du foncier dans la région pampéenne, multipliés par 2 à 6 selon les zones de 1990 à 2011 (Márgenes Agropecuarios, 2011). Cette précarité des contrats arrange les pools de culture, qui visent essentiellement le résultat à court terme, et n'ont pas de projet de gestion de la fertilité des sols (ni au plan physico-chimique, ni au plan sanitaire) à long terme. Ces baux très courts favorisent la rotation annuelle ou bisannuelle des locataires sur la parcelle et ainsi l'impossibilité de la construction d'une cohérence agronomique durable des rotations de culture. Dans certains cas, l'historique de la parcelle n'est pas pris en considération et l'administrateur de champ

se prémunit contre tout risque sanitaire en utilisant des intrants chimiques en préventif.

Certains propriétaires terriens, extérieurs au monde agricole, participent à l'amplification de ce phénomène en cherchant à maximiser la rente dégagée par le loyer, au détriment du maintien de la qualité de leurs sols (Qüesta, 2011). Ils proposent ainsi des loyers équivalents pour toutes les cultures (il existait initialement une distinction de loyer selon la rentabilité de l'espèce mise en culture) et incitent donc au semis du soja, culture la plus rentable, chaque année.

Les répercussions sociales de la spécialisation des terri- toires agricoles

Lors du processus d'*agriculturalización*, la mécanisation, la simplification des tâches agricoles et le recul ou l'intensification des activités d'élevage ont engendré une vague de licenciement des travailleurs ruraux dans la région pampéenne. Les campagnes argentines se sont, petit à petit, désertifiées : migration vers les villes des ruraux sans emploi ; départ, suite à la mise en location de leurs terres, des propriétaires qui résidaient encore sur place. Le peu d'investissements publics dans les infrastructures dans ces zones (coût d'électrification très élevé, routes endommagées,...) et la privatisation des transports ferroviaires (dont les voies sont aujourd'hui surtout utilisées par de grandes entreprises pour le transport de grains) renforce ce phénomène et rend de moins en moins attractive la vie en zone rurale. Les populations se concentrent aujourd'hui dans des « agrovilles », où se trouvent toutes les commodités et services agricoles (banques, écoles, service technique, commerces,...) (Albaladejo, 2011).

Ces systèmes de production très compétitifs et simples à mettre en œuvre à grande échelle ont évincé une frange de petits producteurs ; d'une part, les petites surfaces ne permettent ni de renouveler un parc de machines agricoles devenu obsolète, ni d'assumer une dépendance à des prestataires de service qui priorisent les grandes exploitations. D'autre part, face à la flambée des prix du foncier, de nombreux petits propriétaires ont abandonné l'activité agricole, au profit du faire-valoir indirect.

Avec cette frange de producteurs disparaissent de nombreux savoirs non écrits du monde agricole. De nombreuses exploitations perdent l'identité, les valeurs - le capital culturel et symbolique - des campagnes pampéennes au profit d'une culture « agroproductiviste » (Hernandez et al., 2007). Face au développement croissant des statuts entrepreneuriaux de types « pools de culture », l'agriculture argentine est parfois qualifiée « d'agriculture sans agriculteurs » (Hernandez, 2009) : une agriculture dans laquelle le capital, la force de travail et la prise de décision sur le champ sont complètement dissociés et éclatés aux mains d'acteurs très différents.

Les conditions sociopolitiques de développement de la *sojización*

La diffusion du paquet technologique coordonnée par différents acteurs du secteur agricole

La diffusion à grande échelle du paquet technologique « soja RR-glyphosate-semis direct » s'effectue au travers de la

coordination des acteurs publics et privés, du monde associatif, institutionnel, entrepreneurial et politique. Les entreprises d'agrofourniture apparaissent comme des acteurs centraux de cette révolution, en endossant de multiples rôles : (i) pourvoi de produits phytosanitaires et semences, (ii) conseil technique sur les nouvelles pratiques liées au semis-direct et (iii) octroi de crédits commerciaux favorisant l'accès à tous les éléments du paquet technologique. Au-delà des services proposés, ces entreprises ont développé une démarche de propagation verticale en infiltrant les réseaux sociaux, associations et institutions étatiques, pour diffuser le matériel pédagogique nécessaire à l'adoption de ce paquet technologique (Goulet, Hernandez, 2011). L'Association de producteurs AAPRESID³⁵, créée dans les années 1980, est instrumentalisée par ces entreprises en vue de promouvoir le semis direct et ses vertus en termes de respect de l'environnement (fertilité du sol, limitation de l'érosion...) (Goulet, Hernandez, 2011). Cette promotion par les producteurs eux-mêmes, confortée par les experts et la recherche agricole (notamment l'INTA³⁶), constitue un contre-feu à la contestation, pour des raisons environnementales, de l'usage de semences transgéniques, intimement liées à l'emploi des pesticides.

L'association AAPRESID diffuse à grande échelle, au travers de divers médias (journaux, radios), l'image du nouveau producteur modèle, au statut plus « d'entrepreneur » que « d'agriculteur ». Dans ce contexte, le terme « d'entrepreneur innovant » caractérise les individus dont le succès provient de l'adoption de nouvelles technologies (Hernandez, 2009). L'orientation du conseil agricole privé a suivi et renforcé ce mouvement, en s'adaptant à la demande des producteurs en quête de rentabilité et d'un conseil « efficace », laissant de moins en moins place aux diagnostics agronomiques basés sur l'hybridation des savoirs empiriques des agriculteurs et technico-scientifiques des conseillers, au profit de logiques rapides et sûres basées sur l'usage de pesticides (Grosso et Albaladejo, 2013). De nouveaux profils de conseil émergent, intimement connectés à la vente d'intrants chimiques, c'est le cas « des conseillers en vente » ; les indicateurs de réussite de leur travail ne priorisent plus la satisfaction du producteur, mais se focalisent sur le succès de leurs ventes (Grosso et Albaladejo, 2013).

Des politiques agricoles publiques renforçant le phénomène de *sojización*

Les politiques agricoles argentines ont fait l'objet de plusieurs remaniements ces dernières décennies. Le gouvernement a mis en place en 2006 une politique de restriction aux exportations, suivie en 2012 de restrictions aux importations qui visaient à maintenir la souveraineté alimentaire du pays, relancer l'industrie nationale et équilibrer la balance commerciale. Les restrictions quantitatives à l'exportation, régies par les ROE³⁷ vert et rouge, s'appliquent à plusieurs productions : (i) les exportations de blé sont limitées, pour être commercialisées localement aux moulins et ainsi maintenir bas le prix du pain pour la population argentine ; (ii) les restrictions aux exportations de viande sont menées dans la même optique pour maintenir des prix bas pour la consom-

mation locale ; (iii) dans l'optique de développer les filières avicole et porcine, les exportations de maïs sont aussi limitées pour favoriser une utilisation locale. Ces évolutions politiques placent le producteur dans une position précaire dans laquelle sa perspective à long terme est obérée par une incapacité d'anticipation sécurisée pour mettre en place des cultures de diversification, ce qui oriente la production nationale vers la culture la plus sécurisée : le soja. Le gouvernement argentin n'est pas neutre dans la spécialisation des systèmes de culture et tire profit de l'expansion du soja, dont les produits exportés sont taxés à environ 35%, recettes qui couvrent aujourd'hui une part importante des dépenses de la politique publique argentine.

Conclusion

L'exemple du processus de *sojización* de la région pampeenne illustre les impacts multiples que peut avoir l'adoption massive d'une nouvelle technologie, ici les variétés de soja RoundUp Ready, à l'échelle d'un territoire. Cet exemple peut rappeler des processus à l'œuvre dans certaines parties du bassin parisien, où s'est aussi opérée, depuis les années 1970, une spécialisation vers la « céréalisation », un raccourcissement des rotations (avec des retours de plus en plus fréquents du blé et du colza ; Schott et al., 2010) et un développement de l'utilisation de pesticides.

Comme dans le cas argentin, cette spécialisation résulte d'une combinaison de facteurs propres au contexte agricole français : (i) soutien direct puis indirect du prix des céréales via la Politique Agricole Commune, (ii) recherche d'un accroissement de la productivité du travail par la spécialisation, (iii) concentration géographique de l'appareil agro-industriel, (iv) évolution du conseil technique attaché à la vente d'intrants, priorisant les solutions chimiques, accompagné (v) d'une spécialisation des chercheurs, la céréaliculture et l'élevage spécialisé faisant l'objet de beaucoup plus de travaux que la polyculture élevage (Meynard, 2012).

Cette évolution a elle aussi eu des répercussions négatives à différentes échelles : perte d'autonomie des exploitations et sensibilité accrue aux fluctuations du marché, gaspillage de ressources non renouvelables (peu de recyclage de N, P, K...), pollutions des eaux par les pesticides et nitrates, réduction de l'hétérogénéité des mosaïques paysagères,... Comme en Argentine, l'évolution de l'offre variétale est cohérente avec ces changements de systèmes de culture : la sélection se concentre sur les espèces majeures (blé dur, blé tendre, colza, maïs, pour les grandes cultures en France), qui assurent aux sélectionneurs privés un meilleur retour sur investissement. En parallèle, les variétés multi-résistantes aux maladies, qui permettraient de réduire notablement l'usage des pesticides (Meynard et al., 2009) restent un marché minoritaire. La recherche publique s'investit sur la sélection de variétés de blé multi-résistantes, mais abandonne au début des années 2000 la sélection de nombreuses espèces de diversification. Cette convergence suggère que ce n'est pas tant le caractère transgénique des variétés de soja (ni même un rôle de « *deus ex machina* » de Monsanto) qui a poussé la *sojización* de la Pampa, que la cohérence entre la disponibilité de variétés tolérantes au glyphosate et les dynamiques sociotechniques à l'œuvre dans le pays.

³⁵ Association Argentine de Producteurs en Semis Direct

³⁶ Institut national argentin de recherche agronomique

³⁷ Registro de Declaraciones Juradas de Ventas al Exterior de productos agrícolas.

Cependant, des différences importantes existent entre les deux pays, qui empêchent encore l'agriculture du Bassin Parisien de rejoindre la région pampéenne dans certaines évolutions radicales. Dans le contexte argentin, l'absence de réglementations concernant l'accès au foncier et la libéralisation de l'économie ont permis à de nouveaux acteurs extérieurs au monde agricole (les pools de culture) de spéculer sur l'activité agricole, non plus au travers des marchés financiers, mais en contrôlant directement la production. En France, cette évolution est aujourd'hui encore freinée par le maintien de réglementations restreignant l'accès au foncier, limitant ainsi le développement de logiques productivistes à court terme (signature d'un bail agricole pour une durée d'au moins 9 ans - sauf dérogation -, et imposition de différentes démarches administratives pour être autorisé à exploiter la terre). Les producteurs restent des agriculteurs de métier, qui, en majorité, connaissent les risques liés aux rotations très courtes et aux monocultures ainsi que les effets des stratégies de désherbage basées sur une seule molécule sur l'apparition de populations d'adventices résistantes. Dans le cas du bassin parisien, les politiques publiques ont joué un rôle incontestable dans la spécialisation des productions, en focalisant les aides sur certaines cultures de rente et en soutenant certaines filières (par exemple, colza et blé pour les biocarburants). Cependant, on assiste depuis quelques années à un infléchissement des politiques publiques et la société française, qui finance directement une partie de l'activité agricole par les aides, revendique le développement de pratiques plus durables. En Argentine, encore peu d'études sont réalisées sur les impacts environnementaux de l'agriculture, les notions « d'agriculture intégrée », « d'agriculture biologique » ou encore de « pratiques économes en intrants » restent encore marginales. À l'inverse de son homologue français, le producteur argentin ne reçoit pas d'aides et est taxé sur les produits qu'il exporte, cette source de financement contribuant directement à la mise en œuvre de la politique sociale du gouvernement, et limite ainsi la légitimité de la société argentine à revendiquer l'évolution des pratiques.

Bibliographie

- Albaladejo C., 2011. Les transformations de l'espace rural pampéen face à la mondialisation. *Annales de Géographie*, Juillet-Août 2012, 387-409
- Alvarez C., Mulin E. 2004. *El gran libro de la siembra directa*, Buenos Aires, Clarín Rural
- Andrade F., Sadras V. 2002. *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*, Balcarce, EEA INTA
- Benton T.G., Vickery J.A., Wilson J.D. 2003. Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key? *Trends in Ecology and Evolution*, Avril 2003, 18-188
- Carreño L.V., Pereyra H., Ricard M.F. 2010. Captura y emisión de gases de efecto invernadero, in: Viglizzo E.F., Jobbágy E.G. (Eds.), *Expansión de la Frontera Agropecuaria en Argentina y su Impacto Ecológico-Ambiental*, Buenos Aires, INTA, 31-36
- Carreño L.V., Viglizzo E.F., 2010. Efecto de la agricultura sobre la provisión de servicios eco-sistémico, in: Viglizzo E.F., Jobbágy E.G. (Eds.), *Expansión de la Frontera Agropecuaria en Argentina y su Impacto Ecológico-Ambiental*, Buenos Aires, INTA, 47-52
- Caviglia O.P., Sadras V.O., Andrade F.H. 2004. Intensification of agriculture in the south-eastern Pampas I. Capture and efficiency in the use of water and radiation in double-cropped wheat-soybean. *Field Crop Research*, Janvier 2004, 117-129
- Garavano M.E., Manetti P.L., Lopez A.N., Clemente N.L., Salvio C., Faberi A.J. 2013. Cebos molusquicidas y molusquicidas líquidos para el control de *Deroceras Reticulatum* (Pulmonata: Stylomatophora), plaga en el cultivo de colza. *RIA*, Avril 2013, 60-66
- González Montaner J., 2002. Cambios en el razonamiento en siembra directa : la visión sistémica aplicada a la nutrición y sus consecuencias sobre el balance de carbono, in: *Jornada de actualización técnica para profesionales "fertilidad 2002"*, Buenos Aires, 12-18
- Grosso, S. 2009. Les pools de culture: diversité des combinaisons financières et productives, in: *DEMETER 2010 : Economie et stratégies agricoles*, Paris, 223-254
- Grosso, S., Albaladejo, C. 2013. Eessor du conseil privé et nouveaux profils professionnels des ingénieurs agronomes en Argentine. *Economie Rurale*, Septembre-Octobre 2013, 29-39
- Goulet F., Hernandez V. 2011. Vers un modèle de développement et d'identités professionnelles agricoles globalisées ? *Tiers Monde*, Juillet-Septembre 2011, 115-132
- Guibert, M., Sili, M., Arbeletche, P., Piñeiro, D., Grosso, S. 2011. Les nouvelles formes d'agriculture entrepreneuriale en Argentina et en Uruguay. *Economies et Sociétés*, Octobre 2011, 1807-1825
- Hernandez V. 2009. Ruralidad y el paradigma de los agronegocios en las pampas gringas, in Gras C.
- Hernandez V. (Eds.), *La Argentina rural. De la agricultura familiar a los agronegocios*, Buenos Aires, Biblos, 18p
- Hernandez V., Ould-ahmed P., Papail J., Phélinas P. 2007. Entrepreneurs "sans terre" et "pasteurs de la connaissance": une nouvelle bourgeoisie rurale? In : Hernandez V. (Ed.), *Turbulences monétaires et sociales. L'Amérique latine dans une perspective comparée*, Paris, l'Harmattan, 209-258
- Manuel Navarrete D., Gallopin G.C., Blanco M., Diaz Zorita M., Ferraro D.O., Herzer H., Laterra P., Morello J., Murmis M.R., Pengue W., Piñeiro M., Podestà G.P., Satorre E.H., Torrent M., Torres F., Viglizzo E., Caputo M.G., Celis A.. 2005. *Análisis sistémico de la agriculturización en la pampa húmeda argentina y sus consecuencias en regiones extra-pampeanas: sostenibilidad, brechas de conocimiento e integración de políticas*. Serie Medio Ambiente y Desarrollo N° 118, CEPAL, Santiago de Chile
- Márgenes Agropecuarios. 2011. Año 26 N° 308, Febrero 2011
- Ménard, M. 2014. Semences transgéniques, glyphosate et Cie: le bilan après 15 ans. *Grandes cultures*, Janvier 2014, 12-19
- Meynard J.M., Dedieu B., Bos A.P. 2012. Re-design and co-design of farming systems, in: Darnhofer I., Gibon D., Dedieu B. (Eds.), *An overview of methods and practices. Farming*

Systems Research into the 21th century: The new dynamic, Berlin, Springer, 407-432

Meynard J.M., Rolland B., Loyce C., Félix I., Lonnet P. 2009. Quelles combinaisons variétés / conduites pour améliorer les performances économiques et environnementales de la culture de blé tendre ? *Innovations Agronomiques*, Novembre 2009, 29-47

Monzon J.P., Sadras V.O., Abbate P.A., Caviglia O.P. 2006. Modelling management strategies for wheat-soybean double crops in the south-eastern Pampas. *Field Crops Res.*, Février 2007, 44-52

Qüesta, L. 2001. *Los propietarios rentistas y el uso del suelo. Estudio realizado en el Distrito Gálvez (pcia de Santa Fe, Argentine)*. Mémoire de fin d'études. FCA - UNL

Salembier C., Meynard J.M., 2013. Evaluation de systèmes de culture innovants conçus par des agriculteurs: un exemple dans la Pampa Argentine. *Innovations Agronomiques*, Octobre 2013, 27-44

Saluso A., De Carli R., Zaccagnini M.E., Bernardos J., Decarre J., Caceres C. 2005. *Guía práctica para el control químico de artrópodos plaga en soja considerando el riesgo de toxicidad aguda para las aves*. Proyecto monitoreo ecotoxicológico de biodiversidad en agroecosistemas pampeanos, INTA, Entre Rios

Schott, C. Mignolet C., Meynard J.M. 2010 Les oléoprotéagineux dans les systèmes de culture : évolution des assolements et des successions culturales depuis les années 1970 dans le bassin de la Seine. *OCL*, Septembre-Octobre 2010, 276-291

Studdert G., Dominguez G., Agostini M., 2009. *Labranzas y rotaciones para un uso sustentable de los suelos del sudeste de la provincia de buenos aires, Argentina*. Simposio "Efectos de la Agricultura, la lechería y la ganadería en el recurso natural suelo: impactos y propuestas, Montevideo, Uruguay

Studdert G., Echeverria H. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Sciences Society of America Journal*, Juillet 2000, 1496-1503

Viglizzo E.F., Carreño L.V., Pereyra H., Ricard F., Clatt J., Pincén D. 2010. Dinámica de la frontera agropecuaria y cambio tecnológico, in: Viglizzo E.F., Jobbágy E.G. (eds.), *Expansión de la Frontera Agropecuaria en Argentina y su Impacto Ecológico-Ambiental*, Buenos Aires, INTA, 9-16

Viglizzo E.F., Frank F.C. 2010. Erosión del suelo y contaminación del ambiente, in: Viglizzo, E.F., Jobbágy E.G. (eds.), *Expansión de la Frontera Agropecuaria en Argentina y su Impacto Ecológico-Ambiental*, Buenos Aires, INTA, 37-42.

Inscription d'une variété de sorgho obtenue par sélection participative au Mali dans des projets multi-acteurs

Catalog registration of a new variety of sorghum obtained by PPB in Mali as result of multi-stakeholder projects

Thierry LEROY¹ - Oumar COUMARE² Mamoutou KOURESSY³ - Gilles TROUCHE¹ Amadou SIDIBE³ - Salifou SISSOKO³

Abocar TOURÉ³ - Timothée GUINDO⁴ Bougouna SOGOBA⁵ - Fousséni DEMBÉLÉ⁶ Boubou DAKOUCO⁷ - Michel VAKSMANN¹ Harouna COULIBALY³ - Didier BAZILE⁸ Dominique DESSAUW^{9*}

¹ CIRAD - UMR AGAP - Avenue Agropolis - 34398 Montpellier Cedex 5 - France

² AOPP - Kalaban Coura Bamako - Rue 200 Porte 533 - Bamako Mali

³ IER - Po Box 262 - Bamako - Mali

⁴ COAP - Projet FFEM - Bamako - Mali

⁵ AMEDD - Darsalam II - Route de Ségou - BP 212 - Koutiala - Mali

⁶ GRAADECOR - BP 481 - Quartier Kabaïla - Face à l'école Tiéba Sikasso - Mali

⁷ UACT - Tominian - Mali

⁸ CIRAD, UPR GREEN, F-34398 Montpellier, France

⁹ CIRAD, DGDERS-Valo, F-34398 Montpellier, France

*Corresponding author : dominique.dessauw@cirad.fr

Résumé

En Afrique sub-saharienne, 90% des semences de mil et de sorgho sont autoproduites par les agriculteurs. La recherche de variétés plus productives et rustiques a conduit une association d'organisations paysannes (AOPP) à tester des variétés améliorées en conditions paysannes. L'AOPP participe maintenant à la multiplication et à la diffusion de semences certifiées et s'insère dans une démarche de sélection participative associant recherche, ONG et Organisations Paysannes (OP).

Dans le cadre de deux projets sur la gestion de l'agrobiodiversité, une variété de sorgho, *Keninkeni Dieman*, a été inscrite au catalogue malien en 2012. De plus, une coopérative, GDBA-Mali, a été créée en associant ONG et OP travaillant sur cette thématique. Elle prendra en charge des programmes de sélection participative et la diffusion de semences.

À travers ces projets et l'inscription de variétés avec des OP, on peut mesurer l'évolution des systèmes semenciers en Afrique de l'Ouest, de systèmes informels d'un côté ou étatiques de l'autre, à un système plus complexe et international.

Mots-clés

Sélection participative, inscription au catalogue variétal, Mali, sorgho, agrobiodiversité.

Abstract

In sub-Saharan Africa, 90% of millet and sorghum seeds are self-produced by farmers. An association of Malian farmers (AOPP) tested improved varieties in farmer's fields in order to identify more productive and hardy varieties. The AOPP is now involved in certified seed production and diffusion and participatory plant

breeding approaches combining research, NGOs and farmer organizations (FOs).

Within the framework of two projects dealing with the management of agrobiodiversity, a new sorghum variety, *Keninkeni Dieman* was registered in the national variety catalog in Mali in 2012. In addition, a new cooperative named *Gestion Durable de la Biodiversité Agricole* (GDBA-Mali), engaging FOs and NGOs, was launched, with the objective to support the participatory plant breeding programs, variety development and dissemination of improved seeds.

The initiatives of these projects and the registration of the new variety show the evolution of the seed systems in West Africa, from a totally informal or state regulated system to a more integrated and complex international system.

Key-words

Participatory plant breeding, variety catalog registration, Mali, sorghum, agrobiodiversity.

Introduction

Le sorgho et le mil sont parmi les principales céréales alimentaires en Afrique de l'Ouest et particulièrement au Mali et au Burkina Faso. Des efforts de recherche importants ont été entrepris dès les années 1950 par les programmes nationaux pour sélectionner des variétés plus productives et produisant un grain de bonne qualité. Ces programmes n'ont cependant pas permis de proposer aux paysans des variétés significativement supérieures aux variétés traditionnelles qu'ils avaient l'habitude de sélectionner dans leurs parcelles et d'échanger entre eux de façon informelle.

De plus, les évolutions récentes techniques et climatiques démontrent l'importance d'une gestion raisonnée de la diversité agricole afin de la maintenir pour une meilleure utilisation par les populations rurales et la recherche.

À partir des années 1990, des programmes de sélection participative se sont donc mis en place principalement sur les céréales. Ces programmes se sont développés en Afrique de l'Ouest en associant en partenariat la recherche à des organisations paysannes et à des ONG, mais aussi dans d'autres parties du monde avec le même type de partenariat (Ceccarelli, 2012). Ces projets avaient pour but de prendre en compte les contraintes et les objectifs des agriculteurs dans les processus de sélection. Ainsi, deux projets de gestion de la diversité agricole à travers la sélection participative ont été menés grâce au financement du Fonds Français pour l'Environnement Mondial (FFEM) d'abord dans deux pays, le Mali et le Burkina Faso de 2002 à 2007, puis uniquement au Mali pour la seconde phase du projet (de 2010 à 2014).

Contexte historique

Les populations des pays pauvres dépendent largement des produits de l'agrobiodiversité pour leur alimentation. Cependant au fur et à mesure de l'évolution de l'agriculture, du développement du commerce, de l'accroissement démographique et de l'accélération des migrations, l'agrobiodiversité a été mise à mal à tel point que la base alimentaire de l'humanité ne provient plus que de 12 espèces cultivées (Mazoyer et Roudart, 2002 ; Brookfield et al., 2002). Ce sont les «méga-cultures» parmi lesquelles figurent le riz, le blé, le maïs, le sorgho, le mil, la pomme de terre et la patate douce (Vernooy, 2003). L'Afrique de l'Ouest abrite

des centres d'origine pour de nombreuses espèces cultivées d'intérêt mondial comme le mil (*Pennisetum glaucum*), le sorgho (*Sorghum bicolor*) et le riz africain (*Oryza glaberrima*) pour les plus importantes (Chantereau et Nicou, 1991 ; FAO et al., 2004). La plupart des variétés locales de ces espèces présentent un niveau élevé de diversité génétique et il est important de bien comprendre comment l'approvisionnement en semences des paysans participe aux dynamiques de cette agrobiodiversité.

Beaucoup de ressources phytogénétiques agricoles sont le résultat d'une intervention de l'homme. Elles ont été sélectionnées et améliorées consciemment par les agriculteurs depuis les origines de l'agriculture. Plus récemment, les sélectionneurs ont exploité cette diversité avec des effets remarquables sur l'amélioration des variétés : développement de résistances à des maladies ou des ravageurs, accroissement des rendements, amélioration des paramètres gustatifs, etc.

Depuis les années 1960, de nombreuses missions de prospection et de collecte ont été organisées par des organismes internationaux (FAO, Icrisat, Orstom (actuel IRD), etc.) en collaboration avec les instituts nationaux de recherches agricoles des pays africains. Les accessions de céréales africaines issues de ces collectes sont conservées dans les principales collections localisées à l'Icrisat (Niger, Inde) pour le mil et le sorgho, et à l'IRD et au Cirad (France), pour le fonio, le mil et le sorgho. Malheureusement, la conservation des semences *ex situ* (en chambres froides) pose des problèmes spécifiques. Périodiquement, il faut les soumettre à la régénération pour disposer de semences viables. Comme elles ne sont pas placées dans leurs écosystèmes naturels, la co-évolution avec la microflore du sol ou avec les parasites en conditions climatiques changeantes, et l'adaptation qui devrait s'en suivre, est absente (Fonteneau et al., 2005 ; Wood et Lenne, 1997 et 1999).

Les programmes d'amélioration des cultures, industrielles aussi bien que vivrières, fonctionnent depuis plusieurs décennies en Afrique de l'ouest sur un schéma centralisé où l'État développe des semences améliorées puis en assure la fourniture auprès des paysans (Coulibaly et al., 2008). Les deux missions principales du Service Semencier National à savoir, i) contribuer à l'offre de nouvelles variétés améliorées de plantes cultivées ; ii) rendre disponible du matériel adapté stocké *ex situ* en vue de sa multiplication et de sa distribution, ne sont pas complètement assumées par l'État malien. Concernant les cultures vivrières d'Afrique de l'Ouest, la recherche a longtemps été essentiellement menée dans les stations nationales de recherche agronomique ou dans des Centres Internationaux de Recherche. Malgré les innovations développées par la recherche, on remarque que les cultures vivrières de mil et de sorgho sont celles qui ont enregistré le moins de progrès. En effet, les surfaces occupées par les variétés améliorées représentent moins de 5% au Mali.

Depuis les premières années de son indépendance, le Mali a inscrit dans ses priorités la mise sur le marché national de semences de variétés améliorées en vue d'une augmentation quantitative et qualitative de la production céréalière nationale. L'objectif assigné à la recherche agricole était de produire des variétés améliorées capables de faire face à l'accroissement démographique galopant des pays sahéliens

et au phénomène d'urbanisation. L'accent a été mis sur la recherche de variétés à plus haut rendement avec une bonne adaptation des produits aux besoins et aux goûts des consommateurs urbains. Cette option requiert dans la plupart des cas une densité de plantes accrue, l'utilisation d'engrais organique et/ou chimique et une humidité appropriée du sol pour aboutir au potentiel de production escompté. Le modèle de développement a simplement été copié sur les gains substantiels obtenus avec ce schéma dans le cadre de la Révolution Verte en Asie (Matlon, 1985). Mais les essais ont surtout mis en évidence qu'en absence d'engrais, les rendements des variétés traditionnelles sont supérieurs ou égaux à ceux des variétés améliorées. Ainsi, Matlon (1985) cite que sur 7000 introductions de sorghos criblés par l'Icrisat, seules deux variétés se sont montrées supérieures dans les conditions paysannes. Les réactions physiologiques et les mécanismes de résistance des cultures à la sécheresse sont maintenant mieux étudiés. La compréhension du photopériodisme permet d'expliquer que sur un gradient latitudinal, il est nécessaire de disposer d'une palette de variétés avec des dates de floraison étalées pour être en parfaite synchronisation avec les dates de début et de fin de saison des pluies (Bacci et Reyniers, 1998 ; Kouressy, 2002 ; Kouressy et al., 2008 ; Reyniers et Netoyo, 1994 ; Vaksman et al., 1996).

Les agriculteurs maliens ont besoin d'une forte diversité de variétés adaptées aux différentes conditions environnementales et techniques du pays. Malheureusement, le système semencier national et les entreprises semi-publiques et commerciales de distribution de semences ont très souvent du mal à fournir ces variétés adaptées aux conditions locales. Depuis l'entrée en vigueur de la Convention sur la Diversité Biologique (CDB) fin 1993, les états sont souverains sur leurs ressources naturelles, il leur revient donc la responsabilité de mettre en place les trois objectifs de la gestion de la biodiversité : la conservation de la diversité, son utilisation durable et le partage juste et équitable des avantages découlant de l'exploitation des ressources génétiques (FAO, 1996, 2009 ; Unep, 1993). Néanmoins, les recommandations de la FAO semblent trop timides pour permettre aux organisations paysannes de prendre en charge la gestion de la biodiversité : « soutenir et promouvoir les organisations d'agriculteurs pour qu'elles puissent exprimer plus efficacement leurs besoins en matière de semences, en veillant tout particulièrement aux besoins des femmes et des groupes vulnérables ou marginalisés ». Les organisations paysannes (OP) doivent donc largement dépasser ce rôle de recensement des besoins, elles doivent activement participer à la mise en place des plans de conservation et de distribution de la diversité variétale existante. Chaque membre d'une OP étant aussi membre à part entière d'une exploitation agricole familiale, l'organisation peut pallier aux insuffisances de l'État. Les OP sont souvent regroupées en Union dans des associations faitières à l'échelon national, telle que l'Association des Organisations Professionnelles Paysannes (AOPP) au Mali. Elles accèdent ainsi à des informations non disponibles dans les villages. Elles acquièrent de ce fait un poids important pour intervenir dans la prise de décision des instances agricoles au niveau national.

Dès le début des années 1990, les organisations paysannes du Mali ont pris leur essor pour s'autonomiser vis-à-vis de la

Compagnie Malienne de Développement des Textiles (CMDT) qui avait mis en place des Associations Villageoises pour faciliter la gestion de la distribution des intrants agricoles et le suivi des récoltes. Le développement des nouvelles structures paysannes est souvent relayé par les syndicats agricoles et appuyé par des structures internationales telles que l'AFDI (Agriculteurs Français pour le Développement International) au Mali. La consolidation de ces OP avec la constitution d'unions et d'associations faîtières au niveau national souligne toute l'importance que jouent aujourd'hui ces structures dans le développement du monde rural et dans la prise de décision dans la politique agricole nationale. En 1997, l'AOPP a organisé un atelier national avec l'ensemble des organisations paysannes membres sur les problèmes rencontrés par les paysans au niveau de leur exploitation agricole. Plusieurs thématiques ressortaient, notamment : la disparition de certaines variétés, la diminution de la qualité des semences (surtout en mil et en sorgho), la baisse de la pluviosité, la baisse des rendements, le coût élevé des engrais et la difficulté d'accès au crédit. Pour répondre à certains de ces enjeux, dont la disparition de certaines variétés paysannes, et la baisse de la qualité des semences, l'AOPP a proposé à ses adhérents d'encadrer une réflexion sur la valorisation des semences certifiées. La Commission Céréales a été créée à cette occasion et elle a développé à partir de 1999 un réseau de paysans expérimentateurs : les *Si fileli kela*. Chaque année, environ une vingtaine d'OP locales bénéficient d'une formation pour 15 de leurs paysans adhérents. L'AOPP demande aux agents du Service Semencier National, qu'elle sélectionne, d'assurer cette formation sur l'utilisation des semences certifiées et la conduite de tests en milieu paysan par le paysan lui-même. L'AOPP achète les semences certifiées et les distribue aux paysans qui vont comparer sur un quart d'hectare leurs variétés locales à la variété améliorée proposée par les formateurs (Bazile, 2006).

Aujourd'hui à travers le Mali, cette expérience contribue à l'existence d'un large réseau de plus de 1000 paysans expérimentateurs qui font de façon automatique un bilan des essais conduits après chaque campagne agricole. La qualité de ce réseau montre que les paysans ne sont pas hostiles à l'innovation et qu'ils peuvent élaborer des outils propres de suivi pour capitaliser les expérimentations conduites. Même si les moyens dont disposent les OP sont réduits, le dispositif conçu et développé par l'AOPP au Mali reflète l'esprit de partage de semences et d'expérience au sein de la communauté traditionnelle africaine. Les apports extérieurs en semences certifiées permettent un enrichissement du pool génétique local pour s'adapter en permanence aux aléas climatiques, à la conjoncture économique et aux objectifs de production des paysans. Dans tous les cas, ce recours aux semences certifiées vient en complément du système traditionnel d'auto production et d'échanges de semences dans le cadre familial et villageois, qui reste le système dominant. La réussite de la planification des essais en milieu paysan par l'AOPP montre qu'il est possible de lier deux systèmes *a priori* indépendants au départ. Le contrôle réalisé sur le Service Semencier National permet de travailler avec un agent vulgarisateur qui est capable d'intervenir en milieu paysan en adaptant sa communication aux connaissances et à la technicité des paysans. Un pas important est alors fran-

chi dans la circulation de l'information qui est vraiment dirigée vers le paysan qui en a besoin, ce n'est plus à lui de venir chercher le catalogue des semences certifiées et de le déchiffrer. Le revers de ce contrôle strict est que l'AOPP reproduit un processus de prise de décision individuel à une échelle nationale. Elle cherche à identifier « la variété » améliorée qui correspond aux spécificités de la zone géographique des essais. Elle simule de ce fait pour un ensemble d'OP membres une stratégie individuelle de choix de variétés de céréales sans tenir compte de la variabilité locale des villages et des exploitations agricoles.

Jusque dans les années 1990, la sélection variétale était réalisée exclusivement par la recherche nationale en collaboration avec des équipes internationales et a abouti à :

- Créer des collections *ex situ* lors de grandes missions de prospection des années 1960-1980 ;
- Créer des variétés en station, dans des systèmes de culture intensifs, éloignés des pratiques paysannes souvent à très faible niveau d'intrants ;
- Développer, à partir des années 1990, des cellules d'expérimentation et de distribution de semences au sein des OP, regroupées dans l'AOPP ;
- Favoriser l'émergence d'OP et d'ONG impliquées dans la gestion de la biodiversité.

Dans le même temps, l'AOPP s'est orientée à partir des années 2000 vers la production de semences. À partir de 2006, 7 coopératives semencières ont été créées (3 dans la zone de l'Office du Niger et 4 dans la zone exondée pour les cultures pluviales), puis 5 nouvelles en 2011 (4 dans la région de Koulikoro et 1 à Ségou) pour la production de semences certifiées par la Direction Nationale de l'Agriculture, pour dix espèces cultivées (mil, sorgho, maïs, riz, niébé, fonio, arachide, sésame, gombo et bissap). L'AOPP est donc entrée de plein pied dans le système officiel. Les coopératives achètent la semence de base auprès de la recherche nationale. Des magasins de stockage ont été construits et équipés dans chaque coopérative. Les coopératives fixent le prix des semences, développent un réseau local de vente et d'appui-conseil et établissent un circuit d'information et de publicité.

Concomitamment, un certain nombre de changements sont intervenus dans les systèmes de régulation des variétés et semences :

- Une harmonisation des législations et réglementations semencières successivement des pays membres du Cilss (Comité permanent Inter-États de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel), de la Cedeao (Communauté Économique des États de l'Afrique de l'Ouest) et de l'Uemoa (Union Économique et Monétaire Ouest-Africaine) ;
- L'établissement d'un catalogue commun pour les pays des organisations ci-dessus sur la base des catalogues nationaux existants (le catalogue et les règlements du Mali datent de 1987) ;
- L'établissement de manuels de procédures d'inscription des variétés nouvelles et de certification des

semences qui ont été revus et adaptés à la situation du Mali ;

- La mise en place d'un système régional de protection des variétés par Certificat d'Obtention Végétale (COV) à travers l'OAPI (Organisation Africaine de la Propriété Intellectuelle).

Excepté dans quelques pays comme le Sénégal, la plupart des pays de l'Afrique de l'Ouest ne possédait pas, jusqu'au milieu des années 2000, de législation régulant la commercialisation des variétés et des semences et la protection des droits de propriété intellectuelle comme il en existe dans de nombreux pays européens. Au Mali, l'inscription des variétés se faisait sous déclaration des obtenteurs avec une description des caractéristiques de la variété dont la liste des critères varie selon les espèces. Une visite de terrain dans les parcelles d'expérimentation de l'obteneur pour vérifier que la variété correspondait bien à la description et était distincte de toute autre variété connue était suffisante.

Il faut rappeler que la réglementation sur les variétés et les semences, lorsqu'elle existe, est une obligation qui s'impose à tous. Dans le système mis en place en Afrique de l'Ouest, qui est une copie du système européen, l'inscription au catalogue est une autorisation officielle de commercialisation et de culture d'une variété qui a dû auparavant démontrer qu'elle était nouvelle et donc distincte de toute autre variété connue et qu'elle apportait un intérêt par rapport aux variétés déjà cultivées (rendement supérieur, résistance à une maladie ou un insecte, qualité supérieure...). Les tests vérifiant que les conditions sont réunies sont effectués par un service officiel qui teste les variétés pendant au moins deux ans pour les espèces annuelles. Les catalogues régionaux sont l'addition des catalogues nationaux (UE, Cedeao).

La certification des semences est aussi une obligation pour commercialiser les semences d'une variété inscrite au catalogue. Les services officiels de contrôle et de certification délivrent une étiquette normalisée selon la génération de multiplication et l'espèce. L'OCDE a mis en place des normes de certification qui sont suivies par la plupart des pays possédant un système de certification. L'adoption des mêmes normes pour les différents pays permet les transferts transfrontaliers de semences et de régler les litiges sur la qualité des semences qui est contrôlée par des laboratoires labellisés par l'ISTA (International Seed Testing Association).

La protection des variétés est indépendante des deux systèmes précédents. Ce n'est pas une obligation légale, chaque obteneur choisissant librement de protéger ou non sa création variétale. Le titre de propriété obtenu est, pour les pays membres de l'UPOV (Union internationale pour la Protection des Obtentions végétales), un COV. Pour obtenir un COV, la variété doit être nouvelle, distincte, homogène et stable (DHS) comme pour l'inscription au Catalogue et souvent les tests de validation sont effectués en même temps pour le COV et pour l'inscription au Catalogue.

Plusieurs initiatives régionales ont traité de l'inscription au catalogue variétal et de la certification de semences au cours des années 2000 (voir figure 1) :

- En 2006, le Cills (regroupant 9 pays) développe une convention cadre instituant une réglementation commune en matière de semences ;
- En 2008, la Cedeao (regroupant 15 pays) adopte un règlement pour harmoniser les règles régissant la qualité, la certification et la commercialisation des semences. Un catalogue Ouest-Africain des variétés végétales est créé ;
- En 2009, l'Uemoa (regroupant 9 pays) adopte un règlement similaire ;
- Finalement, les 3 associations régionales se sont accordées pour développer un catalogue et une base de données variétale commune. La version 0 du catalogue, compilation des catalogues nationaux, est parue en 2008 avec l'appui de la FAO. Elle concerne les espèces de mil, sorgho, maïs, riz, arachide, niébé, manioc, igname, pomme de terre, oignon et tomate mais pas les cultures industrielles.

Les nouvelles règles pour l'inscription au catalogue variétal instaurées au Mali par la loi 10-032 du 12 juillet 2010 et par le décret 10-428/P-RM du 9 août 2010 suivent celles imposées en Europe et décrites plus haut. Il faut notamment que le service officiel d'expérimentation teste les variétés pendant deux années pour vérifier que celles-ci sont bien DHS et qu'elles apportent une amélioration pour les critères importants par les tests de VAT (valeur agronomique et technologique). Il faut noter que, dans la législation européenne, le critère environnemental (VATE) a été introduit pour l'inscription au catalogue dans un objectif d'un meilleur respect de l'environnement. Il serait intéressant d'introduire ce critère en Afrique où les systèmes de culture utilisent peu les intrants.

Dans le même temps, les pays membres de l'OAPI (regroupant 17 pays, voir figure 2) ont institué par l'accord de Bangui de 1999, entré en vigueur le 28 février 2002, un système régional de protection de la propriété intellectuelle dont la dixième et dernière annexe instaure pour les obtentions végétales un système de COV conforme au système UPOV, acte de 1991. Ce système est entré en vigueur en 2006, avec la possibilité dérogatoire, et limitée dans le temps, de protéger les anciennes variétés déjà cultivées et qui ne répondaient donc pas au critère de nouveauté. Cette protection des anciennes variétés a permis aux obtenteurs des pays concernés de lancer les premières démarches. La règle de DHS est la même que pour les pays du Nord et donc très restrictive.

Toutes les espèces cultivées sont protégeables pour une durée maximale de 25 ans. La protection est valable dans les 17 pays membres. Les agriculteurs ont le droit d'utiliser sur leur propre exploitation, à des fins de reproduction ou de multiplication, le produit de leur récolte obtenu à partir d'une variété protégée (à l'exception des plantes fruitières, forestières et ornementales), sans limitation de surface ni paiement d'une « contribution volontaire obligatoire » (CVO) comme en France pour le blé tendre.

L'homogénéité stricte imposée pour l'inscription comme pour la protection peut conduire à rejeter des variétés traditionnelles sélectionnées par les paysans comme les variétés-population.

Notre article se propose de présenter l'inscription de nouvelles variétés issues de sélection participative et obtenues dans le cadre d'une collaboration internationale. Nous montrerons comment les nouvelles réglementations influencent

la mise en œuvre de l'inscription au catalogue et la protection de ces variétés. Les contraintes et limites du système qui se met en place en Afrique de l'Ouest seront discutées.

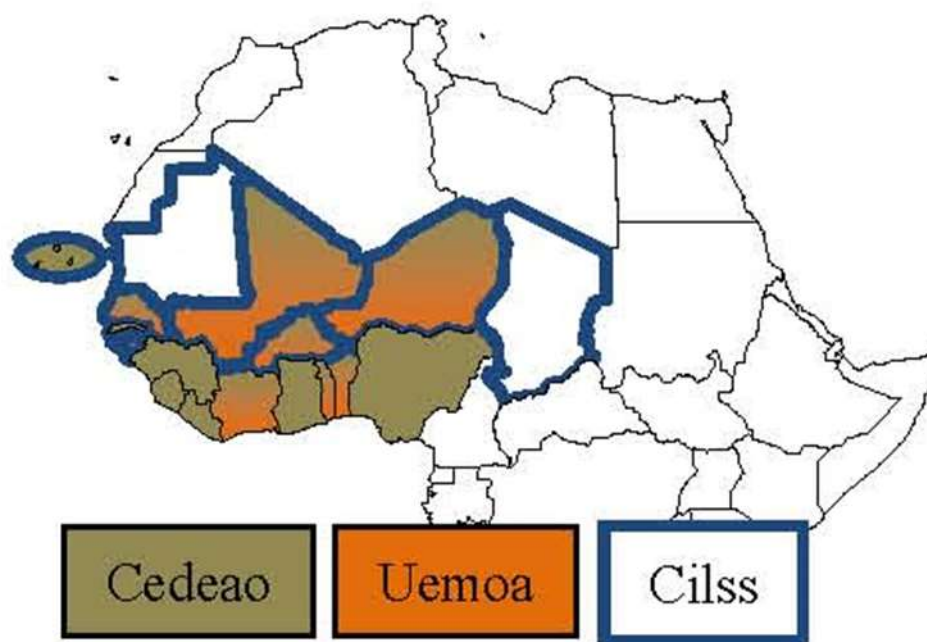


Figure 1 - Carte des associations régionales en Afrique de l'Ouest

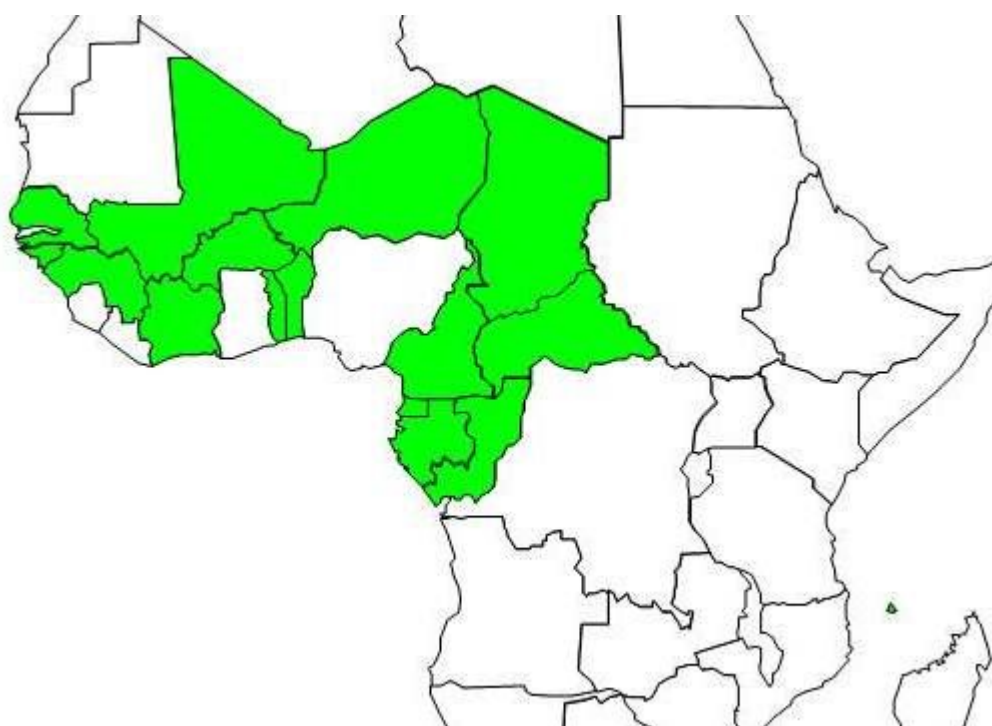


Figure 2 - Carte des pays membres de l'OAPI

Méthodes

Deux projets ont été menés à bien grâce à des financements du Fonds Français pour l'Environnement Mondial (FFEM) : au Burkina Faso et au Mali (2002-2007, FFEM1) puis au Mali dans une deuxième phase (2010-2014, FFEM2). Les activités du projet FFEM2 sont la suite des activités de sélection du projet FFEM1 dont le but était de produire des variétés li-

gnées. En effet, les paysans avaient choisi de se positionner dans le système formel de diffusion de semences. Dans ce cas, l'orientation de l'amélioration vers la sélection de variétés lignées est presque obligatoire, car on ne peut pas

aujourd'hui inscrire des variétés constituées de populations hétérogènes.

Le sorgho a fait l'objet de nombreux programmes de sélection depuis les années 1960. Malheureusement, l'adoption des variétés améliorées proposées directement par la recherche aux paysans a été très faible, tant à cause de structures semencières peu performantes que du décalage entre les qualités des variétés sélectionnées en station de recherches et la valeur des mêmes variétés en conditions paysannes, en particulier leur manque de photosensibilité et leur qualité technologique insuffisante (Chantereau *et al.* 2013). Ces systèmes prenaient également trop peu en compte la diversité des agrosystèmes paysans et leurs objectifs de production.

Le concept de sélection participative s'est développé au cours des années 1990 (Sperling *et al.* 1993). Il consiste à intégrer les savoirs scientifiques et locaux développés par les paysans, en les faisant intervenir lors du processus de sélection et de développement de nouvelles variétés. Au Mali et au Burkina Faso, les programmes de sélection participative du sorgho regroupent donc, outre les institutions de recherche, les organisations paysannes, les ONG et des organisations internationales comme l'Icrisat ou le Cirad. Au Mali comme au Burkina Faso, ce sont de véritables programmes de création participative qui ont été mis en place, avec une mise en champs paysans des lignées en cours d'amélioration à un stade très précoce de la sélection (F2-F3).

Au Burkina Faso, dans le cadre du programme de sélection participative, une collaboration entre plusieurs institutions de recherche (Inera, Cirad, Icrisat), des organisations paysannes (AMSP, Teenga Wende) et des ONG (ADRK) a produit des lignées pures issues de plantes choisies par sélection généalogique chez des producteurs dans une population à base génétique large adaptée à la zone de 600-900 mm de pluies annuelles. La population initiale a été créée en collaboration avec les producteurs de l'organisation paysanne Teenga Wende dans les villages de Somé et Pouni-Nord dans le Centre-Ouest du Burkina Faso, selon une méthodologie de création participative décrite par Vom Brocke *et al.* (2008 et 2010). Cette population était issue du croisement en fécondation libre entre quinze variétés locales ou améliorées avec une population mâle stérile. La descendance de ces croisements a été conduite jusqu'en F2, puis les plantes fertiles ont ensuite été sélectionnées par sélection généalogique. Cette sélection s'est déroulée dans deux villages du Centre-Ouest avec les producteurs partenaires et à la station de recherche de Inera à Saria dans les mêmes conditions agro-écologiques. Les F4 ont été introduites au Mali puis ont été multipliées à la station de recherche de l'Icrisat à Samanko. Les lignées pures issues de cette sélection ont été testées dans les essais multilocal du FFEM2 et deux d'entre elles sont susceptibles d'être inscrites après Keninkeni dieman.

Au Mali, le processus était plus complexe et il s'agissait de sélection participative plutôt que de création variétale participative. Le programme consistait à créer une population à large base génétique mais comportant une majorité de variétés locales et notamment les cultivars prospectés dans les villages partenaires (Vaksmann *et al.*, 2008). L'amélioration du matériel de base était réalisée par la succession de plu-

sieurs courtes sélections généalogiques. Un bloc de croisement était constitué de décembre à mars. Il comprenait environ 300 parents. Chaque année, 800 croisements étaient réalisés. Les hybrides F1 étaient cultivés de janvier à mai. Une première sélection par les chercheurs avait lieu en station, au sein des populations F2, en saison normale de culture (de juin à novembre). Les plants sélectionnés F3 étaient soit orientés vers une sortie variétale par sélection généalogique participative soit réintroduits dans le bloc de croisements pour donner naissance à la population de base de l'année suivante. Ce travail nécessitait l'alternance de nombreux cycles d'intercroisements et de sélection. C'est pourquoi, un système d'accélération du développement des générations, en contre-saison, avait été mis au point pour permettre la réalisation de trois générations par an soit un cycle de sélection complet.

Les descendances F3 étaient mises en essais simultanément en champs paysans et en station de recherches pour une sélection conjointe des meilleures descendances. Les descendances choisies par les paysans et les chercheurs étaient alors fixées par sélection généalogique pour aboutir à des lignées pures fixées en F7. Elles étaient alors proposées aux paysans pour leurs champs de production.

La variété Keninkeni est issue de ce programme de sélection participative, et a été sélectionnée dans le projet FFEM1. Cependant, la présence d'anthocyane dans les tiges de cette variété, qui pouvait provoquer une coloration rouge de la farine (tô) qui en était issue, était considérée comme rédhibitoire pour sa commercialisation, surtout pour les consommateurs urbains. L'anthocyane a donc été éliminée par un cycle de 5 rétrocroisements entre cette variété et une variété apparentée (issue de la même F3 de départ) qui ne présentait pas cette coloration de la farine. Ce travail a permis l'obtention de la variété Keninkeni Dieman, mise en essai de pré vulgarisation dès 2011, puis déposée au catalogue officiel en 2012.

Dans les deux pays, les chercheurs et les paysans ont fait le choix de travailler avec des lignées afin de fixer le progrès génétique dans des variétés stables diffusables dans le système formel de diffusion de semences. Ces lignées sont toujours cultivées en complément des variétés-populations traditionnelles qui restent prédominantes dans la plupart des exploitations. Le rôle des paysans dans la sélection est fondamental, puisque le choix définitif des descendances qui seront fixées en variétés se fait toujours avec tous les intervenants (recherche, OP, ONG) dans les parcelles paysannes. Les différences entre les deux pays concernent surtout le stade d'intervention des paysans, qui est plus en amont au Burkina qu'au Mali. Dans la mesure où les objectifs de sélection au départ sont définis par tous les partenaires dans les projets, on peut considérer qu'il s'agit bien de sélection participative, et non d'une simple évaluation participative de matériel créé par la recherche.

Résultats

Obtention des variétés

Dans le cadre du projet FFEM2, un réseau multilocal d'expérimentation a été mis en place durant les 4 ans du projet (2010 à 2013) selon le dispositif suivant :

- Trois zones d'étude couvrant des conditions de culture différentes : Sikasso, Koutiala et Tominian du Sud au Nord de la zone de culture du sorgho à l'Est du Mali ;
- Deux villages choisis dans chaque zone ;
- Deux essais préliminaires et 10 essais avancés par village.

Dans le cadre des projets FFEM, l'évaluation des variétés issues des programmes de sélection participative se fait sur les caractères agronomiques, la productivité, la précocité, les caractéristiques de la panicule et du grain. Les essais préliminaires permettaient de tester jusqu'à une vingtaine de nouvelles obtenues au Mali comme au Burkina Faso, mais aussi de les comparer à des variétés améliorées importées ou issues d'une sélection menée dans les centres de recherche. Toutes les variétés testées n'étaient pas toujours des lignées F7, mais pouvaient parfois être des lignées moins avancées (F4 à F6). La sélection des variétés dans ces essais s'est faite après une évaluation phénotypique par les paysans et leur famille (y compris pour leur valeur culinaire estimée) et une analyse des rendements en grain par variété.

Les essais avancés ont permis, à l'issue des tests préliminaires, de tester sur une surface un peu plus importante les lignées qui avaient été choisies par les partenaires du projet. Ces essais, au nombre d'une dizaine par village, regroupaient en général six variétés en test, comparées à des variétés témoins connues des chercheurs et des paysans. Sur ces variétés, des tests culinaires complets ont été faits pendant les campagnes de 2012 et 2013.

La variété Keninkeni Dieman a aussi été testée, dans le cadre du projet, dans des essais de « pré vulgarisation » sur des parcelles entières dans les trois régions.

Avec ces tests multilocus, la variété Keninkeni Dieman et deux variétés issues des programmes menés avec le Burkina Faso ont été proposées pour la vulgarisation au Mali. Pour la variété Keninkeni Dieman, des parcelles de production de semences de 0.4 ha ont été mises en place dès 2012 pour préparer sa diffusion. Les deux autres variétés, PBE O4-X7/1V-1S-2-2 et 10-SB-GII-DT-405, sont en cours de multiplication. Les Tableaux 1 et 2 présentent quelques caractéristiques et résultats de production pour les trois variétés sélectionnées.

Variété	Keninkeni Dieman	PBE O4-X7/1V-1S-2-2	10-SB-GII-DT-405
Type	Guinea-caudatum	Guinea-caudatum	Guinea-caudatum
Précocité, pluviométrie optimale	700-900 mm	500-700 mm	700-900 mm
Hauteur de la variété	Courte	Moyenne	Courte
Nombre de jours semis-maturité	110-130 jours	100-110 jours	110 jours
Zone de culture optimale	Koutiala-Sikasso	Tominian	Koutiala

Tableau 1 - Principales caractéristiques phénotypiques des trois variétés sélectionnées dans le projet FFEM au Mali

Site	Keninkeni Dieman	PBE O4-X7/1V-1S-2-2	10-SB-GII-DT-405
Tominian 2011	947 (1091) 92% variété améliorée 16 essais	925 (485) 152% variété locale 4 essais	Non testé
Tominian 2012	Non testé	1583 (732) 144% variété locale 19 essais	Non testé
Koutiala 2011	1526 (689) 135% variété locale 19 essais	2300 (1000) 102% variété locale 4 essais	2500 (1300) 111% variété locale 4 essais
Koutiala 2012	Non testé	639 (468) 88% variété locale 19 essais	1076 (498) 148% variété locale 19 essais

Tableau 2 - Résultats de productivité des trois variétés, comparées à un témoin local ou amélioré, dans les essais préliminaires (4 sites) ou avancés (16 à 19 sites) conduits en champs paysans dans les régions de Koutiala et Tominian en 2011 et 2012. Les résultats sont en kg de grains par ha, l'écart type est donné entre parenthèses, et le pourcentage par rapport à un témoin local ou sélectionné est indiqué.

Les variétés sélectionnées dans le cadre du projet couvrent donc des zones de culture différentes du Mali et permettent aux agriculteurs de disposer de sélections productives et adaptées à leurs conditions de culture. Il est remarquable de noter que les variétés adaptées à des conditions de Tomian (faible pluviométrie) ne sont pas adaptées du tout aux conditions de Koutiala (cas de la variété PBE).

Les variétés ont également été évaluées pour leur phénotype au champ par les agriculteurs de chaque région, avec un système de cartons (blanc, jaune ou rouge) du plus apprécié au rejet de la variété. Cette évaluation reposait sur une appréciation phénotypique de la plante, sa production, de l'aspect, la couleur et la conservation des grains. Les variétés PBE et 10-SB sélectionnées par le projet ont eu des taux d'appréciation par les paysans de l'ordre de 50% d'appréciations favorables, ce qui est tout à fait satisfaisant. Il faut noter que la variété 10-SB a été appréciée très différemment dans les deux villages de la région de Koutiala. Dans tous les cas, les agriculteurs apportent la préférence maximale (90%) à la variété locale qu'ils connaissent et ont l'habitude de cultiver. Des tests culinaires de ces variétés ont été faits en 2013. Ces tests portaient sur la qualité du grain et sa conservation, la qualité et la conservation du tô. Le tô a été réalisé par les femmes du village, et il a été ensuite dégusté par un panel varié de dégustateurs. Les deux variétés issues du projet ont passé ces tests avec succès, elles ont été appréciées par le panel, et peuvent donc être distribuées auprès des agriculteurs. Cette appréciation phénotypique et culinaire des variétés par les agriculteurs eux-mêmes constitue une étape primordiale du processus de sélection participative, elle permet de valider par les agriculteurs le choix des variétés améliorées à distribuer.

Définition des règles de copropriété et stratégie de protection

Deux ateliers employant la méthode participative ont été organisés en 2011, le premier en janvier pour présenter à tous les partenaires les différents traités internationaux (Convention sur la Diversité Biologique et Protocole de Nagoya, Traité international sur les ressources phytogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture ou Tirpaa, Convention UPOV 1991, etc.) et les types de droits de propriété intellectuelle (brevet, COV, marques...). Un « noyau dur DPI » a ensuite été créé au sein du projet, animé d'abord par Mamoudou Togo, salarié de l'AOPP, à qui nous rendons ici hommage puis, après son décès, par Oumar Coumaré. Les partenaires ont pu dans un premier temps s'approprier ses notions complexes.

Le deuxième atelier a été organisé en octobre 2011 et a permis de définir en commun les conditions de copropriété et la stratégie de protection. Les conclusions de l'atelier ont ensuite été validées par le Comité de Coordination Nationale du projet (CCN) du 22 février 2012 ce qui lui a donné son caractère officiel.

Cinq étapes ont été identifiées lors du processus de sélection participative :

1. Définition des objectifs de sélection
2. Création de variabilité par croisements entre variétés locales et lignées élités

3. Sélection de plantes et lignées entre les générations F2 et F4
4. Evaluation multilocale à partir de la génération F4 ou F5
5. Diffusion de la variété auprès des agriculteurs et multiplication de semences.

La décision du CCN de février 2012 est la suivante :

« A la suite des propositions faites par le noyau DPI lors de l'atelier d'octobre 2011 et des compléments d'information apportés durant la réunion scientifique, le CCN a validé les règles pour la copropriété des variétés :

- Un partenaire est reconnu comme copropriétaire d'une variété s'il a participé aux étapes 1 (définition de objectifs de sélection) ET 4 (évaluation des lignées) ou à l'étape 3 (sélection dans des populations en ségrégation = phase de création des lignées), qui généralement intègre les deux étapes précédentes ;
- Lorsque la copropriété est reconnue, les partenaires copropriétaires sont propriétaires à parts égales des variétés ; cela signifie un partage égal des frais et des recettes ».

La stratégie de protection des droits de propriété intellectuelle est la suivante : au cours du second atelier, tous les partenaires ont rejeté le maintien dans le secteur informel, afin d'éviter une possible appropriation de leur travail par des tiers, et assurer la reconnaissance et la visibilité du travail effectué. De plus, devant le constat que 1) l'inclusion dans le Tirpaa ne donne pas de garantie que les partenaires reçoivent un jour un partage des avantages sur l'utilisation des variétés, 2) le coût du COV est rédhibitoire (près de 3000 euros à l'OAPI) et ne se justifie que si une activité commerciale peut se développer et 3) l'inscription au catalogue est une obligation légale et permet que la variété soit décrite, publiée sur des registres publics et donc notoirement connue et ne puisse pas être appropriée par un tiers, les variétés seront protégées par l'inscription au catalogue. Si une variété présente l'opportunité d'un développement commercial par la vente de semences, une demande de protection par COV auprès de l'OAPI sera déposée.

Inscription au catalogue malien de la variété Keninkeni Dieman

Une première variété de sorgho Keninkeni Dieman, résultat du projet, a été inscrite sur le catalogue officiel des espèces et variétés du Mali en 2013 suivant l'ancienne procédure de description de la variété et de visite sur le terrain des expérimentations par le Labosem (Laboratoire des Semences de l'Ier).

Deux demandes d'inscription selon les nouvelles procédures DHS et VAT pour les variétés de sorgho PBE O4-X7/1V-1S-2-2 et 10-SB-GII-DT-405 issues du projet ont été déposées auprès du Comité National des Semences d'Origine Végétale (CNSOV). Cependant, ces demandes sont bloquées par l'absence de mise en œuvre concrète des nouvelles procédures. Notamment, le CNSOV n'a pas pour l'instant les moyens de réaliser les tests DHS et VAT. Les coûts afférents à l'inscription au catalogue du Mali avec les nouvelles procédures ne sont pas encore connus, contrairement au coût

de la protection par COV qui avoisine les 3000 euros à l'OAPI.

Discussions et perspectives

Les programmes de sélection participative mis en place au Burkina Faso et au Mali avec la collaboration des ONG, des OP et des Instituts nationaux et internationaux de recherche agronomique ont permis d'obtenir de nouvelles variétés lignées déposées au catalogue malien, conjointement par tous les acteurs associés au processus d'amélioration végétale.

Le premier dépôt selon le système simplifié est acquis. Deux autres variétés vont être inscrites avec le protocole complet DHS/VAT mis en place par la Cedeao. Ce nouveau système pose cependant de gros problèmes aux partenaires du projet puisque la procédure est très longue, très couteuse et implique des structures nationales ou régionales qui ne sont pas encore opérationnelles. Malheureusement, il n'est plus possible, depuis 2013, d'inscrire des variétés selon l'ancienne procédure. Les partenaires du projet FFEM2 se proposent d'ailleurs de rencontrer les autorités politiques et administratives pour mettre en place des procédures les plus simples possibles et les rendre effectives et acceptables par des groupements tels que celui issu du projet.

Le système de protection des variétés par COV est lourd et onéreux pour les partenaires dans le cadre de projets locaux de sélection participative. Cependant, la protection est nécessaire pour protéger les obtenteurs contre le bio-piratage. L'inscription au catalogue est, dans tous les cas, obligatoire pour cultiver une variété nouvelle, et la description de la variété permet d'assurer sa protection. C'est donc le choix qui a été fait dans le cadre du projet. Cependant, il faut noter que les nouvelles règles de l'inscription au catalogue n'étaient pas connues lorsque ces décisions ont été prises. Les frais de la nouvelle procédure d'inscription au catalogue et ses modalités exactes ne sont pas encore clairement établies. Il ne nous est donc pas possible de comparer les coûts du COV et de l'inscription au catalogue suivant les nouvelles procédures. De plus, il ne paraît pas évident qu'une collaboration et un échange de données soit vraiment mis en place pour les tests DHS entre protection par COV et inscription au catalogue, comme ce qui est réalisé en Europe. Il faudra donc éventuellement reconsidérer la stratégie retenue lorsque les règles seront clairement connues.

Les trois nouvelles variétés déposées par le projet ont l'avantage d'être des lignées pures à base génétique étroite permettant de répondre aux standards DHS/VAT. S'il s'était agi de variétés populations issues d'un travail de sélection massale réalisée par les agriculteurs, celles-ci n'auraient jamais été assez homogènes pour passer les tests DHS. Elles n'auraient donc pas pu être inscrites sur le catalogue ou protégées par un COV. Cette contrainte est très forte dans le cas de l'Afrique et méritera une réflexion régionale avec la participation des organisations paysannes, des coopératives, des ONG et de la société civile. D'autre part, des réflexions sont engagées en France pour reconnaître un statut réglementaire pour les variétés "population" ou issues de la sélection participative (Ducos *et al.*, 2013). Dans le cas des projets de sélection participative en Afrique sub-saharienne, il est possible et souhaitable que des variétés population

soient développées et proposées à l'inscription au catalogue. Pour que ces variétés populations puissent être inscrites au catalogue, il sera intéressant de voir comment, en Europe, le statut de ces variétés sera reconnu et leur inscription sur un catalogue résolu.

Les partenaires ont décidé à la fin du projet de se constituer en entité juridique sous forme de coopérative simplifiée nommée Gestion Durable de la Biodiversité Agricole au Mali (GDBA-Mali). Cette coopérative réunit 9 coopératives, associations, unions de producteurs et ONG. Les Institutions de recherche ne sont pas membres de GDBA-Mali mais lui apporteront un appui technique et scientifique. GDBA-Mali prendra en charge la gestion de la biodiversité agricole au Mali (sorgho, mil, ...) et pourra mener des programmes de sélection participative en collaboration avec la recherche. Elle s'impliquera aussi dans la distribution et la gestion de semences sélectionnées de variétés améliorées.

À travers ces deux projets FFEM et l'inscription de nouvelles variétés, il est possible de mesurer l'évolution des systèmes semenciers en Afrique de l'Ouest passant d'un système totalement informel ou étatique à un système intégré plus complexe et international qui devrait renforcer la protection et les droits des agriculteurs et des utilisateurs. Au Mali, nous ne disposons pas d'un recul suffisant pour apprécier l'impact de notre projet sur l'évolution de la filière semencière. Cependant, la première phase du projet FFEM s'était déroulée aussi au Burkina jusqu'en 2007. Ce pays dispose donc d'un certain recul sur l'impact des projets de sélection participative. Le projet FFEM a eu un impact important sur l'utilisation de variétés améliorées, en particulier pour les zones qui ont participé au projet. Des systèmes de test de nouvelles variétés ont été mis en place, et des structures comme des magasins de semences ont été développés. Par ailleurs, la distribution de semences en mini-sachets a facilité la diffusion des nouvelles variétés. L'impact des programmes de sélection participative a donc été important, même si des obstacles subsistent comme les surfaces insuffisantes dédiées à la production de semences et les difficultés pour l'inscription de nouvelles variétés. Le Mali pourra s'inspirer de l'expérience burkinabè pour maximiser l'impact des programmes de sélection participative.

Le coût de réalisation des tests pour la protection par COV (DHS pour l'OAPI) ou d'inscription au catalogue (DHS et VAT pour le CNSOV au Mali ou son équivalent pour les autres pays) doit être pris en charge par les obtenteurs. Vu le coût élevé, il est à craindre que les organisations paysannes ne puissent financer ces frais, même si certaines procédures permettent aux nationaux de recevoir des aides comme dans le cas de l'OAPI. À terme, ces difficultés financières pourraient entraîner une diminution importante du nombre de variétés cultivées et une baisse de la biodiversité disponible chez les producteurs. Il faudra donc trouver les mécanismes d'aide nécessaires au niveau national et régional pour maintenir la présence des OP dans la création, le maintien, l'utilisation et la valorisation de la biodiversité agricole. La future mise en place d'une Organisation panafricaine de la propriété intellectuelle (OPAPI) par l'Union Africaine pourrait également faire évoluer les législations, les procédures et le cadre régional des réglementations pour la protection des variétés dans un cadre plus large de discussions sur les interactions entre propriété intellectuelle, res-

sources génétiques, indications géographiques, savoirs traditionnels et CDB.

Bibliographie

Bacci, L., Reyniers, F.N. (Eds), 1998. *Le futur des céréales photopériodiques pour une production durable en Afrique tropicale semi-aride*. Actes du séminaire international, 27-30 avril 1998. CeSIA, CIRAD, Florence (Italie), 270 p

Bazile, D., 2006. *State-farmer partnerships for seed diversity in Mali*. Londres, IIED, 22 p. (Gatekeeper Series, IIED, 127). <http://www.iied.org/pubs/pdf/full/14519IIED.pdf>

Brookfield, H., Padoch, C., Parsons, H., Stocking, M., 2002. *Cultivating biodiversity*. London, ITDG Publishing and United Nations University

Ceccarelli, S., 2012. *Plant breeding with farmers: a technical manual*. ICARDA, Aleppo, Syria, 137 p

Chantereau, J., Cruz, J.F., Ratnadass, A., Trouche, G., 2013. *Le sorgho*, Ed. Quae, Presses Agronomiques de Gembloux, 245 p

Chantereau, J., Nicou, R., 1991. *Le sorgho*. Le technicien d'agriculture tropicale. Maisonneuve & Larose, Paris (France), 159 p

Coulibaly, H., Bazile, D., Sidibé, A., Abrami, G., 2008. Les systèmes d'approvisionnement en semences de mils et sorghos au Mali : production, diffusion et conservation des variétés en milieu paysan. *Cahiers Agricultures*, 17, 199-202

Ducos, G., Pujol, J.L., Teillant, A., 2013. *Pour un secteur des semences diversifié et innovant*. Commissariat général à la stratégie et à la prospective, Premier Ministre, Note d'analyse n°05, octobre 2013, 16 p

FAO, 1996. *Plan d'action mondial pour la conservation et l'utilisation durable des ressources phytogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture*. FAO, Rome (Italie)

FAO, 2009. *Traité international sur les ressources phytogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture*. FAO, Rome (Italie)

FAO, GTZ, IDRC, CTA et STP/CIGQE (Es), 2004. *La biodiversité agricole en Afrique de l'Ouest. Situation actuelle, expériences et perspectives*. Atelier régional sur la biodiversité agricole tenu à Bamako (Mali) du 15 au 19 décembre 2003. FAO, 272 p

Fonteneau, A., Dulloo, E., Sidibe, A., 2005. *Linking farmers and genebanks in Mali*. GeneFlows, 24

Kouressy, M., 2002. *Étude de la durée du cycle des sorghos locaux du Mali. Comparaison avec la durée de la saison des pluies. Évolution sur les 20 dernières années*. DEA Population - Environnement, Université du Mali / ISFRA, Bamako (Mali), 55 p

Kouressy, M., Dingkuhn, M., Vaksmann, M., Heinemann, A.B., 2008a. Adaptation to diverse semi-arid environments of sorghum genotypes having different plant type and sensitivity to photoperiod. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 357-371

Kouressy, M., Traoré, S.B., Vaksmann, M., Grum, M., Maikano, I., Soumaré, M., Traoré, P.S., Bazile, D., Dingkuhn, M.,

Sidibé, A., 2008b. Adaptation des sorghos du Mali à la variabilité climatique. *Cahiers Agricultures*, 17, 95-100

Matlon, P.J., 1985. Analyse critique des objectifs, méthodes et progrès accomplis à ce jour dans l'amélioration du sorgho et du mil : une étude de cas de l'ICRISAT/ Burkina Faso. In: H.W. Ohm and J.G. Nagy (Eds), *Technologies appropriées pour les paysans des zones semi-arides d'Afrique de l'Ouest*. Purdue University, West Lafayette, Indiana (USA), 181-211

Mazoyer, M., Roudart, L., 2002. *Histoire des agricultures du monde. Du néolithique à la crise contemporaine*. Le Seuil, Paris (France)

Reyniers, F.N., Netoyo, L. (Eds), 1994. *Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique Tropicale. Vers une gestion des flux hydriques pour les systèmes de cultures*. Séminaire international, Bamako, 9-13 décembre 1991. Science et changements planétaires. John Libbey Eurotext, Paris (France), 415 p

Sperling, L., Loevinsohn, M.E., Ntabomvura, B., 1993. Rethinking the farmers' role in plant breeding: local bean experts and on-station selection in Rwanda. *Experimental Agriculture*, 29, 509-519

UNEP, 1993. *Convention on Biological Diversity*. Text and Annexes. CBD/94/1. UNEP/CBD, Montreal (Canada), 34 p

Vaksmann, M., Kouressy, M., Chantereau, J., Bazile, D., Sagnard, F., Touré, A., Sanogo, O., Diawara G., Danté, A., 2008. Utilisation de la diversité génétique des sorghos locaux du Mali. *Cahiers Agricultures* 17, 140-145

Vaksmann, M., Traoré, S. B., Niangado, O., 1996. Le photopériodisme des sorghos africains. *Agriculture et Développement*, 9, 13-18

Vernooy, R., 2003. *Les semences du monde. L'amélioration participative des plantes*. Centre des recherches pour le développement international, Ottawa (Canada) (<http://web.idrc.ca/openebooks/015-2/>)

Vom Brocke, K., Trouche, G., Zongo, S., Abdramane, B., Barro-Kondombo C.P., Weltzien, E., Chantereau, J., 2008. Création et amélioration de populations de sorgho à base large avec les agriculteurs au Burkina Faso. *Cahiers d'Agriculture*, 17, 146-153

Vom Brocke, K., Trouche, G., Weltzien, E., Barro-Kondombo, C.P., Gozé, E., Chantereau, J., 2010. Participatory variety development for sorghum in Burkina Faso: Farmers' selection and farmers' criteria. *Fields Crops Research*, 119, 183-194

Wood, D., Lenne, J.M., (Eds), 1999. *Agrobiodiversity: Characterization, utilization and Management*. CABI Publishing, Wallingford (Royaume Uni), 490 p

Wood, D., Lenne, J.M., 1997. The conservation of agrobiodiversity on farm: questioning the emerging paradigm. *Biodiversity and Conservation*, 6, 109-129.

Mise en œuvre de nouvelles stratégies de sélection du sorgho pour les régions à forte contrainte climatique du Mali

Employing new strategies in sorghum breeding for regions of Mali with high climatic stress

Aly BOUBACAR⁽¹⁾ - Assitan DAOU⁽²⁾

Eva WELTZIEN⁽²⁾ - Boba DAKOUO⁽³⁾

Bougouna SOGOBA⁽⁴⁾

Ousmane NIANGALY⁽⁵⁾

Sidi Békaye COULIBALY⁽¹⁾

Hamidou Moussa MAÏGA⁽⁶⁾

Boubacar KONÉ⁽³⁾ - Houzeïmata MAÏGA⁽⁴⁾

Gilles TROUCHE⁽⁷⁾ - Kirsten VOM BROCKE⁽⁷⁾

⁽¹⁾Institut d'Economie Rurale (IER) - Cinzana - Boîte Postale 214 Ségou - Mali - Courriels : alyboubacar02@yahoo.fr scouliba@yahoo.com

⁽²⁾International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT) - Boîte Postale 320 - Bamako - Mali - Courriels : adaou1986@yahoo.fr - e.weltzien@icrisatml.org

⁽³⁾Union des Agriculteurs du cercle de Tominian (UACT) - Tominian Mali - Courriel : sc.uact@yahoo.fr

⁽⁴⁾Association Malienne d'Eveil au Développement Durable (Amedd) - Boîte Postale 212 - Koutiala - Courriels : bougouna.sogoba@ameddml.org - houze.maiga@yahoo.fr

⁽⁵⁾Institut Polytechnique Rural de Formation et de Recherche Appliquée - IPR/IFRA de Katibougou - Boîte Postale 06 - Mali Courriel : ousmanenia2000@yahoo.fr

⁽⁶⁾Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako (USTT) - Boîte Postale 423 - Bamako - Mali - Courriel : maiga_m_hamidou@yahoo.fr

⁽⁷⁾Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (Cirad) - UMR AGAP Avenue Agropolis - 34398 Montpellier Cedex 5 - France Courriels : gilles.trouche@cirad.fr - kirsten.vom_brocke@cirad.fr

Résumé

Développer des variétés à la fois plus productives et bien adaptées aux conditions pédoclimatiques et aux usages locaux est un objectif majeur de l'amélioration du sorgho en Afrique de l'Ouest. Dans les régions au sud du Mali, les agriculteurs peuvent choisir aujourd'hui parmi une dizaine de variétés vulgarisées, alors qu'une seule variété améliorée est diffusée à grande échelle dans la zone sahélienne. Un programme de création variétale décentralisé et participatif du sorgho a été initié en 2011 dans deux villages de cette zone dans le cadre d'un partenariat multi-institutionnel recherche-organisations paysannes-ONGs. Le programme vise à développer des variétés-lignées et des variétés-populations adaptées aux contraintes agronomiques locales et aux besoins des producteurs. Pour cela, il propose plusieurs innovations comme de (i) créer des variétés dans un contexte de fortes contraintes agro-climatiques ; (ii) effectuer la sélection avec des producteurs-clés et leurs familles durant plusieurs années consécutives ; et (iii) appliquer deux méthodes de sélection,

massale et généalogique, pour comparer leur efficacité. Un premier bilan de ce programme montre que les pressions de sélection exercées par les producteurs sont similaires ou moins élevées que celles habituellement appliquées en sélection généalogique conventionnelle. L'analyse préliminaire du progrès génétique obtenu indique qu'au moins un quart des lignées et populations issues de

ce programme sont supérieures à la moyenne de l'essai pour deux caractères de sélection clés, le rendement et la préférence des producteurs. Cette analyse soulève de nouvelles questions, notamment sur le choix des dispositifs expérimentaux permettant d'évaluer le plus précocement possible la stabilité de rendement, et le besoin de développer des index de sélection multi-critères.

Mots-clés

Sorgho, Afrique de Ouest, critères de sélection, sélection participative, sélection décentralisée.

Abstract

Breeding varieties combining improved productivity, adaptation to environmental constraints and local usages and preferences is a priority for plant breeding in West-Africa. In the south of Mali, farmers can often choose from among ten different improved varieties, yet only one adapted variety is disseminated in the sub-Saharan region of Tominian. A harsh, heterogeneous environment and remoteness from any research facilities makes genetic progress difficult in this region of Mali. With the purpose of developing varieties adapted and relevant to farmer's production systems in Tominian, a decentralized, participatory breeding program has been initiated by a multi-institutional partnership that involves local and national farmer organizations as well as NGOs. The program aims to develop population varieties on the one hand and breeding lines on the other hand adapted to environmental constraints and farmers' preferences. For this purpose the program employs different innovations, such as: i) developing breeding lines and populations varieties in complex and marginal environments, ii) carrying out selection with key farmers and their families during several consecutive years, iii) applying two selection methods, mass and pedigree selection, in order to compare their effectiveness. A first result of the program shows that selection pressures applied by farmers are similar or weaker than in convention pedigree breeding programs. A preliminary analysis of the selection gain indicates that at least one fourth of the breeding lines and populations are significantly superior for grain yield and farmer preference when compared to the trial means. This analysis brings to mind new questions, notably concerning the choice of the experimental design in order to evaluate yield stability in early stages of breeding programs, as well as the need to develop relevant multi-trait selection indices.

Key-words

Sorghum, West Africa, participatory breeding, selection criteria, decentralized selection.

Introduction

Au Mali, la culture du sorgho est peu intensifiée car l'accès aux intrants agricoles, et notamment aux engrais chimiques, demeure difficile pour la plupart des agriculteurs. Grâce à leur rusticité et leur meilleure adaptation aux conditions de culture des systèmes d'exploitation traditionnels, les variétés locales de sorgho restent prédominantes dans les systèmes de production (Bazile et al., 2008). En revanche, dans un contexte de croissance démographique conduisant à la saturation de l'espace foncier et de changement climatique, l'utilisation de variétés améliorées de sorgho ayant un potentiel de rendement plus élevé que les variétés locales est une nécessité pour augmenter et sécuriser la production céréalière au Mali (Guéi et al., 2011).

Contrairement au cas des régions cotonnières situées au Sud-Mali, où plusieurs nouvelles variétés-lignées et hybrides sont vulgarisées (Weltzien et al., 2007 ; Rattunde et al.,

2013), une seule variété améliorée, Jakumbè (CSM63E), est cultivée par les paysans de la région aride de Tominian, située dans la zone sud-sahélienne du Mali (Bazile et al., 2008). Le cercle³⁸ de Tominian et la région de Ségou dont il dépend, représentent respectivement 4% (25 550 ha) et 13.5% (131 000 ha) des superficies de sorgho du pays (période 2004-2009, CSA/PROMISAM, 2011).

Dans le cadre du projet « Gestion durable de la biodiversité agricole au Mali » (2010-2014)³⁹, un programme participatif et décentralisé de création variétale du sorgho a été mis en œuvre dans la région de Tominian dans le but d'accroître l'offre de variétés de sorgho pour les producteurs de cette zone agro-climatique. La création variétale participative (*participatory plant breeding* en anglais) implique directement des producteurs et productrices dans tout le processus de développement des variétés, et, en particulier, dans les étapes de sélection au sein des populations en ségrégation (Lançon, 2001). Cette stratégie de sélection s'appuie donc sur les savoirs locaux des producteurs concernant l'espèce considérée, ses conditions de culture, ses contraintes de production, ses utilisations...

La conception de ce programme de création variétale participative du sorgho (partenariat, méthodes et dispositifs de sélection, rôles des producteurs, etc.), s'est appuyée sur diverses expériences de sélection participative conduites sur des cultures vivrières en zones tropicales, en particulier par rapport aux constats ou questionnements suivants :

- Pour choisir une nouvelle variété les producteurs utilisent de nombreux critères de sélection ayant une définition bien plus élaborée que ceux des chercheurs (Sperling et al., 1993 ; vom Brocke et al., 2010 ; Trouche et al., 2009, etc.). Les producteurs évaluent plutôt le « phénotype » de la plante dans son ensemble, en lien avec son environnement de production et son utilité pour les usages locaux, et non pas une liste de caractères individuels comme cela est fait dans les protocoles formels des chercheurs (vom Brocke et al., 2010).

- La zone d'intervention cible est caractérisée par un environnement biophysique difficile. Les sols sont en général pauvres et/ou dégradés (RuralStruc, 2008) et les précipitations sont faibles et très fluctuantes. La seule station de recherche agricole censée représenter cette zone agro-climatique est située à 230 km à l'Ouest de Tominian. Pour augmenter la corrélation génétique entre l'environnement de sélection et l'environnement de production cible, qui est une composante importante de l'équation de réponse à la sélection (Atlin et al., 2001), le choix a été fait de conduire la sélection directement en champs paysans dans l'environnement cible. La forte convergence entre les deux environnements réduit les effets d'interaction Génotype x Environnement pour les caractères complexes et peu hérissables comme le rendement, et en conséquence améliore la réponse à la sélection selon la théorie de la sélection (Atlin et al., 2001).

- Notre recherche a également pour objectif de répondre à la question posée par Lançon et al. (2006) : sur

quelle structure variétale doit être ciblée par la sélection participative ? Dans le cas du sorgho, plante préférentiellement autogame, doit-elle produire des variétés-lignées ou des variétés-populations ? Les lignées pures ont une structure génétique homogène et homozygote ; elles sont généralement mieux adaptées à un environnement agronomique relativement homogène et proche de celui pour lequel elles ont été sélectionnées. Les populations ont une structure génétique hétérogène et hétérozygote ; elles ont en général une meilleure capacité homéostatique et sont donc mieux adaptées à un environnement hétérogène et variable.

- Finalement, et ce n'est pas le moins important, un enseignement clé des expériences de sélection participative précédentes est le partenariat avec une organisation paysanne locale forte. Cela permet d'assurer non seulement une bonne communication entre les chercheurs et les producteurs, mais facilite aussi le partage et la dissémination des résultats (vom Brocke et al., 2014). Dans le cas de ce programme, l'organisation paysanne partenaire, l'UACT, représente une organisation bien structurée, dynamique et qui surtout bénéficie de la confiance des producteurs adhérents.

Pour la mise en œuvre de ce programme de sélection, les chercheurs et les représentants de l'UACT ont décidé de travailler étroitement avec un groupe de producteurs intéressés et volontaires.

D'un commun accord, le programme a été conduit en trois étapes :

- 1) Identification et définition des objectifs et critères de sélection par les producteurs et productrices ;
- 2) Création par les chercheurs des populations de sélection sources à partir des variétés locales ;
- 3) Sélection et évaluation, réalisée *in situ* par les producteurs femmes et hommes impliqués, sous deux niveaux de fertilité des sols et selon deux méthodes de sélection (généalogique et massale) visant à développer des variétés-lignées et des variétés-populations adaptées à la diversité des conditions agronomiques locales et des besoins des producteurs.

L'objectif de cet article est de décrire et discuter les premiers résultats et enseignements de ce programme de création variétale participative du sorgho. Les critères de sélection des producteurs de Tominian pour choisir une nouvelle variété de sorgho sont d'abord examinés. Une analyse des différentiels de sélection, basés sur la performance pour le rendement en grains et la préférence des producteurs, est utilisée comme un indicateur préliminaire pour évaluer les résultats de l'approche suivie (participative et décentralisée) et des méthodes de sélection testées (massale et généalogique).

Matériel et Méthodes

Sites d'intervention

Cette recherche a été réalisée dans le Cercle de Tominian, région administrative de Ségou, qui est située dans la zone sud-sahélienne du Mali, caractérisée par une pluviométrie annuelle comprise entre 500 et 700 mm. Tominian fait partie

³⁸ Au Mali, le Cercle est une division territoriale regroupant plusieurs communes et placé en dessous de la région.

³⁹ Projet financé par le Fond Français pour l'Environnement Mondial (FFEM) de 2010 à 2014.

des zones du Mali qui ont très peu bénéficié de l'encadrement technique des producteurs, comparative-ment aux zones cotonnières et rizicoles. Le sorgho y est la deuxième culture vivrière après le mil, avec une superficie moyenne de 25,550 ha et un rendement moyen autour de 800 kg ha⁻¹ (CSA/PROMISAM, 2011). Les sols sont de type ferrugineux tropicaux, typiques de l'Afrique de l'Ouest, dont la texture varie entre gravillonnaire, sableux, limoneux et limono-argileux (Bazile et al., 2008). Ils sont caractérisés par une faible fertilité chimique avec un taux de matière organique en dessous de 0,5% et des teneurs en phosphore très faibles (moins de 5 mg-P/kg) selon les analyses de sols effectuées dans le cadre de cette étude (données non présentées).

Sur proposition de l'UACT, deux villages ont été choisis pour conduire ce programme de sélection. Il s'agit de Kagnan, situé dans la commune rurale de Tominian à 13km à l'Est de cette ville (latitude: 13°13' N; longitude: 4°30' W) et Lénékuy, appartenant à la commune rurale de Sanékuy et situé à 45 km au Sud de Tominian (latitude: 13°02' N; longitude : 4°32' W).

A Kagnan, qui un village très ancien, les sols sont souvent lessivés et acides et les parcelles agricoles bénéficient peu ou pas de fumure organique (fumier ou compost). A Lénékuy, les sols sont en général naturellement plus argileux et moins acides et la fertilisation organique y est plus pratiquée.

Les quantités de pluies enregistrées dans les deux villages et sur la station de recherche agricole la plus proche (SRA de Cinzana) ont varié entre 413 et 578 mm en 2011, entre 836 et 1143 mm en 2012 et entre 530 et 668 mm en 2013.

Partenariat

Le programme de sélection a associé trois institutions de recherches, l'Institut d'Economie Rurale (IER) du Mali, l'Institut International de Recherche sur les Cultures des Zones Tropicales Semi-arides (Icrisat) et le Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (Cirad), une organisation paysanne faîtière (l'Association des Organisations Professionnelles Paysannes-AOPP), une organisation paysanne locale (l'Union des Agriculteurs du Cercle de Tominian-UACT) et une ONG de développement (l'Association Malienne d'Eveil pour le Développement Durable-Amedd). Toutes ces institutions étaient membres du projet « Gestion durable de la biodiversité agricole au Mali ».

Les objectifs généraux de l'étude et le schéma de sélection ont été formulés par les chercheurs. Ils l'ont ensuite expliqué aux autres partenaires qui l'ont approuvé au cours d'une réunion du Comité de Coordination Nationale du projet⁴⁰. Par la suite, des rencontres de planification des activités et d'échanges sur les résultats ont été organisées annuellement à Tominian avec des représentants de toutes les institutions partenaires.

Dans ce programme, l'UACT a joué un rôle particulièrement important. Elle a participé au choix des conditions de sélection cibles, des populations de sélection sources et du dispositif et méthodes d'évaluation ex post. Elle était aussi chargée de proposer les producteurs impliqués dans ce programme. Le choix final de ces producteurs a été fait d'une manière participative avec les chercheurs selon les critères suivants : 1) être membre de l'UACT, 2) être cultivateur de sorgho et de mil dans son exploitation agricole, 3) être réceptif vis-à-vis de nouvelles technologies à diffuser, et 4) être disposé à collaborer avec la recherche. Ainsi, huit producteurs-sélectionneurs (quatre par village) ont été choisis pour conduire les étapes de sélection prévues en 2011 et 2012. Ces producteurs ont été impliqués dans la mise en œuvre de toutes les activités afférentes à la création variétale. Pour les opérations de sélection, les producteurs ont été accompagnés par des membres de leur famille. Pour l'étape d'évaluation multi-locale du matériel génétique issu de ce programme, réalisée en 2013, les essais ont été conduits chez 24 producteurs (12 par village) choisis eux-aussi par l'UACT selon les mêmes critères que ceux utilisés pour les huit producteurs précédents. Le tableau 1 détaille le nombre de participants (producteurs et leur famille) qui ont participé aux travaux de sélection et aux essais d'évaluation.

	2011			2012			2013		
	F	H	Total	F	H	Total	F	H	Total
Kagnan	0-2	1-2	11	1-3	1-3	15	0-7	2-13	20
Lénékuy	0-1	2-3	12	0-3	1-2	14	5-6	10-12	17

Tableau 1 - Nombres maximum, minimum et total de producteurs femmes et hommes qui ont participé à la sélection dans les différentes parcelles de sélection (2011 et 2012) et à l'évaluation des différents blocs de l'essai multi-local (2013), dans les deux villages de Kagnan et Lénékuy

Animation du programme de sélection participative

Entre 2010 et 2013, plusieurs ateliers de formation des producteurs et des conseillers techniques ONG et ateliers de concertation entre tous les partenaires ont été organisés dans le cadre de l'animation du programme (tableau 2). Pour identifier les conditions cibles de sélection, qui représentent les conditions de production auxquelles les nouvelles variétés doivent répondre, des interviews individuelles et semi-structurées avec les huit producteurs-sélectionneurs (PSL) désignés par l'UACT ont été menées en 2011. Les questions posées concernaient les systèmes de culture du sorgho et ses contraintes, la caractérisation des champs d'expérimentation dans les deux villages, les variétés cultivées et leurs caractéristiques. Pour choisir les parcelles d'expérimentation, les chercheurs et les producteurs ont identifié ensemble des parcelles utilisées régulièrement pour la culture de sorgho.

Ensuite pour les besoins du dispositif, des parcelles ont été choisies sur un sol relativement fertile et d'autres sur un sol relativement pauvre. Cette classification a été en outre validée pour le village de Lénékuy par des analyses de sol réalisées a posteriori à la fin de la campagne agricole 2011.

⁴⁰ Organe de pilotage de ce projet.

Action	Objectif	Période	Producteurs	Techniciens
Formation sur la conduite des essais variétaux	renforcer l'autonomie des producteurs pour la mise en œuvre des essais variétaux	Avril 2011	4	1
		Mai 2013	30	2
Formation en création participative	Renforcer les connaissances sur les principes de sélection des populations et lignées	Avril 2012	12	2
		Juin 2012	8	2
Enquête préliminaire	Identifier des conditions cible et les objectifs de sélection des producteurs	Juillet 2011	8	1
Sélection participative	Sélectionner des plantes préférées au sein des populations	Octobre 2011	23	2
	Sélectionner des plantes préférées au sein des populations et lignées	Octobre 2012	29	2
Evaluation des tests multi-locaux	Conduire et documenter l'évaluation des populations et lignées développées par le programme	Novembre 2013	30	2
Restitutions de fin de projet	Restituer et discuter les résultats aux producteurs et autres intéressés	Décembre 2013	100	4

Tableau 2 - Actions menées pour l'animation et le renforcement des capacités des producteurs testeurs

Matériel génétique

Les populations sources du programme de sélection ont été choisies en fonction de leur adaptabilité à la zone d'intervention (durée du cycle à maturité entre 90 et 110 jours) et du type de plante préféré par les producteurs, c'est-à-dire ressemblant au morphotype de leurs variétés locales de race Guinea. Trois des quatre populations sources utilisées sont originaires du Burkina Faso, Tom10-P3 et Tom10-P4, toutes deux issues des croisements entre une

population naine à dominante guinea et une variété locale du Burkina Faso, et PSL04-N°5/2 issue d'un des programmes de création participative conduit au Burkina Faso (vom Brocke *et al.*, 2008). La quatrième population est issue du croisement entre une bonne variété locale de Tominian (Ariho) et la variété améliorée précoce Jakumbé, très appréciée dans la région de Tominian (tableau 3). Ce croisement a été effectué suite à une demande des représentants de l'UACT de « rendre la variété Ariho plus précoce ».

Nom	Description
Tom10-P3	Population à base génétique large issue des croisements entre la Population <i>guinea</i> Naine X Pelogo Fiibsablega (variété locale guinea précoce du Burkina Faso)
Tom10-P4	Population à base génétique large issue des croisements entre la Population <i>guinea</i> Naine X Gnessiconi (variété locale guinea précoce du Burkina Faso)
PSL 04 N°5/2	Population issue des croisements entre une population dérivée d'une variété locale précoce caudatum (Pisnou) et une variété locale guinea (locale Sandié), toutes deux du Burkina Faso
Ariho×CSM63E	Population F2 issue d'un croisement entre une variété locale guinea de Tominian (Ariho) et la variété améliorée préférée CSM63E (Jakumbé)

PSL=Population Sanmatenga à base génétique Large;

Tableau 3 - Description des populations sources utilisées dans le programme de sélection

Méthodes de sélection et dispositifs expérimentaux

Le schéma général de sélection s'appuie sur deux méthodes de sélection appliquées à partir d'une même population source : (1) La sélection massale (SM) visant à produire des « variétés-populations » et (2) la sélection généalogique (SG) pour obtenir des « variétés-lignées ». La sélection a été conduite sous deux niveaux de fertilité des sols, à savoir en sol fertile et en sol peu fertile (pauvre), selon l'identification faite par les producteurs. Pour accentuer la différence de fertilité, les parcelles dites « en sol fertile » ont reçu une fumure organique sous forme de fumier ou de compost (environ 3 t ha⁻¹) et une fumure minérale composée de 100 kg ha⁻¹ de Di-ammonium phosphate (DAP) et 50 kg ha⁻¹ d'urée. Les parcelles dites « en sol pauvre » ont reçu seulement 100 kg ha⁻¹ de DAP. Selon les conditions prédominantes de leurs propres champs, chaque producteur-sélectionneur a opté soit pour une sélection en sol fertile soit en sol pauvre.

Le travail de sélection a débuté en saison des pluies 2011. Les chercheurs ont demandé à chaque PSL et membres de sa famille de sélectionner au sein de la population source qui leur a été attribué les plantes qui rassemblent les caractéristiques recherchées par rapport à leurs objectifs de produc-

tion. Ces critères de choix ont été documentés par les agents techniques et les chercheurs.

Après cette 1^{ère} année, deux méthodes de sélection ont été appliquées :

- Sélection massale : Pour chaque combinaison population source x PSL, la moitié des semences issues de chaque panicle sélectionnée en 2011 a été mélangée pour constituer la population améliorée de cycle 1, dénommée « C1 » (figure 1). Chaque population C1 a ensuite été redonnée au même producteur qui l'a semée dans son champ en saison des pluies 2012 et a poursuivi la sélection selon le même processus suivi en 2011 afin d'obtenir les populations améliorées « C2 ».
- Sélection généalogique : La deuxième moitié des semences a été utilisée pour initier la sélection généalogique (figure 1). Pour cela, des semences issues de chaque panicle sélectionnée en 2011 ont constitué une lignée G1 dans les parcelles de sélection implantées en saison des pluies 2012. Toutes les lignées issues d'une même population source ont été conduites ensemble chez le même PSL, qui, selon les principes de la sélection généalogique, a été invité à faire d'abord une sélection de meilleures lignées et ensuite des plantes préférées à l'intérieur de ces meilleures lignées.

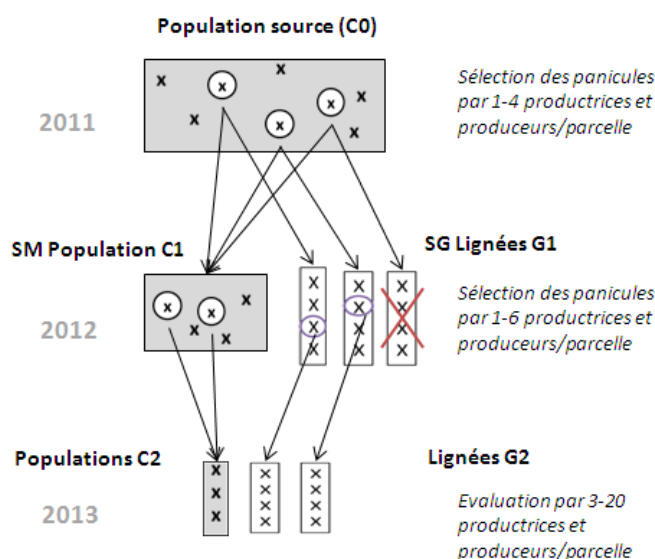


Figure 1 - Schéma de la création participative.

En 2011 chaque population source a été semée sur une superficie de 240 m². Les écartements étaient de 0,80 m entre les lignes et 0,40 m entre les poquets, avec un démariage à deux plantes par poquet, afin d'obtenir environ 1200 plantes. En 2012, chaque PSL a poursuivi la sélection de son propre matériel, c'est-à-dire une population C1 plus les lignées G1 descendant des panicules sélectionnées en 2011. Chaque population C1 a été semée sur une parcelle de 600 m² pour obtenir environ 2500 plantes. Les lignées ont été semées dans un essai conduit selon un dispositif en blocs randomisés avec deux répétitions, avec Ariho comme variété locale témoin et Jakumbé comme variété améliorée témoin. Chaque entrée a été semée sur une ligne de 6m de long avec des écartements de 0,40 m entre les poquets et 0,80 m entre des lignes et un démariage à deux plants par

poquet. Ces expérimentations ont été conduites sous les deux niveaux de fertilité.

Évaluation ex post de la valeur du matériel sélectionné

Après deux cycles de sélection, un essai multi-local a été conduit en saison des pluies 2013 pour évaluer la valeur du matériel génétique issu des deux schémas de sélection (massale et généalogique) et identifier les gains de sélection apportés par rapport aux variétés témoins et aux populations sources. A cet effet, dans chaque village, les 12 producteurs testeurs désignés ont évalué au total 125 entrées différentes réparties entre eux dans des blocs incomplets randomisés, chaque producteur gérant un bloc de 17 entrées dont trois étaient répétées deux fois. Chaque parcelle élémentaire était constituée de deux lignes de 6 m de long avec des écartements de 0,80 m entre les lignes et 0,40 m

entre les poquets sur la ligne. Un démariage a été effectué à deux plants par poquet environ deux semaines après le semis. La fertilisation était identique chez tous les producteurs (80 kg ha⁻¹ de DAP et 40 kg ha⁻¹ d'urée), ce qui correspond à une dose réduite de 20% par rapport à la dose recommandée. Les observations et mesures agronomiques ont été effectuées par un agent technique de l'UACT et un chercheur. Pour cet article, la performance agronomique du matériel sélectionné est jugée par le rendement en grains (RDM) (kg ha⁻¹) calculé à partir du poids sec des grains par parcelle.

En complément, une appréciation ex post des producteurs de toutes les entrées a été réalisée. La méthode appliquée était celle des votes individuels à l'aide de cartes colorées. Chaque producteur évaluateur d'un bloc de 17 entrées de l'essai a reçu 17 cartes blanches (« je souhaite sélectionner cette entrée pour continuer à l'expérimenter »), 17 cartes jaunes (« cette entrée m'intéresse, mais elle a quelques défauts ») et 17 cartes rouges (« je rejette complètement cette entrée »). L'évaluateur a ensuite attribué une seule carte par entrée dans une enveloppe opaque attachée sur la première plante de chaque parcelle. Après comptage des cartes, un index de préférence (IP) a été calculé pour chaque entrée :

$$IP = \frac{[\text{Nombre de carte blanche} \times 1 + \text{Nombre de cartes jaunes} \times 0,5] \times 100}{\text{Nombre total d'évaluateurs}}$$

Les valeurs IP varient ainsi de 0 (entrée ayant reçu uniquement des cartes rouges) à 1 (entrée ayant reçu 100% de cartes blanches). Enfin un différentiel de sélection (DS) a été calculé pour les caractères RDM et IP. Le DS a été défini selon l'équation suivante :

$$DS_i = (a_i - x) / s$$

où a_i est la valeur de l'entrée sélectionnée, x la valeur moyenne du bloc et s l'écart-type calculé à partir des trois entrées répétées dans chaque bloc. Le DS permet de vérifier si la performance d'une lignée ou d'une population sélectionnée est significativement supérieure (ou inférieure) à la moyenne du bloc dans laquelle elle était placée, pour chacun de ces deux caractères. Le calcul des DS permet aussi de comparer des entrées qui sont dans des blocs et villages différents. Des graphiques en boîtes et des nuages de points ont été générés pour mettre en évidence les résultats sur les deux caractères.

Résultats

Identification des critères de sélection

L'enquête sur les conditions de production ciblées pour ce programme de création variétale sorgho à Tominian a confirmé que la variété Jakumbé est la seule variété améliorée intégrée dans le portefeuille variétal des huit producteurs sélectionneurs. Cependant, même si les producteurs ont mentionné plusieurs inconvénients au sujet de leurs variétés locales, Jakumbé, qui est très précoce, tend à être abandonnée par certains producteurs car elle est sensible au charbon « à cause des pluies au moment de la maturité » et est beaucoup attaquée par les oiseaux. La pauvreté des sols

et l'incidence du striga sont des contraintes majeures pour les producteurs interviewés. Les problèmes d'inondation pour les sols les plus argileux est une contrainte spécifique à Lénékuy. Pour les nouvelles variétés, les producteurs souhaitent donc 1) une bonne adaptation à ces contraintes édaphiques locales 2) une résistance au striga, au charbon et à la verse et 3) des variétés précoces mais un peu plus tardives que Jakumbé.

Pour choisir une plante dans une population ou une lignée dans un essai, les producteurs sélectionneurs ont mentionné de nombreux critères. Ces critères ont pu être regroupés en dix aptitudes variétales en 2011 et huit en 2012 (tableau 4). Chacune de ces aptitudes inclut entre un et neuf critères. L'adaptation aux contraintes édapho-climatiques locales (sols pauvres et précipitations erratiques), la forme de la panicule, la qualité technologique des grains et la ressemblance à une variété locale (VL), contribuent particulièrement aux décisions de choix des producteurs. La productivité a surtout été prise en compte en 2011, tandis que l'appréciation de la qualité organoleptique des grains⁴¹ a surtout contribué aux choix des plantes en 2012. En général, les critères des hommes et des femmes s'accordent pour la plupart des aptitudes variétales. Les critères liés à la productivité (dont la grosseur ou le poids et la forme de panicule) tendent à être plus utilisés par les hommes que par les femmes. Par contre les femmes accordent plus d'importance aux critères de qualité organoleptique des grains. La figure 2 montre que la fréquence d'utilisation d'un critère de sélection donné peut changer selon l'environnement de sélection. Par exemple les conditions de faible pluviométrie subies en 2011 ont surtout affecté la performance des populations implantées sur les parcelles en sol peu fertile, ce qui a incité les producteurs à focaliser leurs choix sur les plantes les plus précoces qui avaient échappé à la sécheresse.

Aptitude variétale	2011		2012			
	%	N	%	N	% F!	% H!
Adaptation	24.6	4	24.4	5	21.8	25.9
Productivité	15.3	1	5.2	1	3.8	6.4
Forme de la panicule	23.1	9	22.4	6	16.7	26.9
Qualité technologique des grains	23.4	5	16.0	3	16.1	15.8
Qualité organoleptique des grains	1.7	3	19.5	3	24.5	15.8
Battage	1.1	3	3.4	1	6.9	0.7
Commercialisation	0.1	1	1.0	1	1.2	1.1
Fourrage	1.0	1	-*	-	-	-
Ressemblance aux variétés locales	9.5	7	7.7	10	8.8	6.4
Symptômes de maladie	0.2	1	0.5	-	0.2	0.8

! Critères mentionnés par des femmes (F) et par des hommes (H)

* Critère non mentionné par les évaluateurs

Tableau 4 - Pourcentage des panicules sélectionnées pour un critère lié à une aptitude variétale donnée et nombre des critères utilisés pour caractériser cette aptitude variétale en 2011 et 2012 à Kagnan et Lénékuy

⁴¹ Evaluée par les femmes notamment en croquant les grains pour estimer leur dureté et leur amertume.

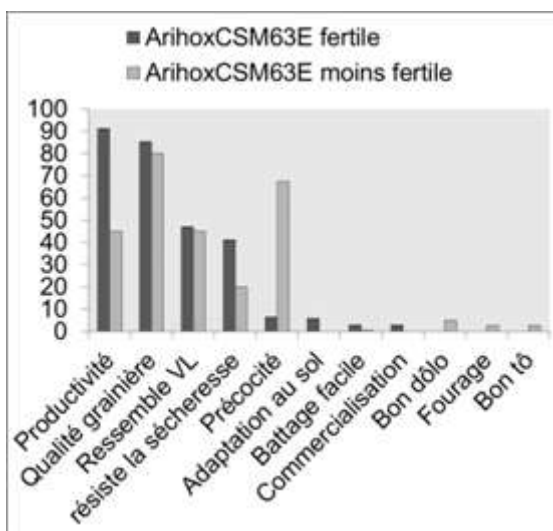


Figure 2 - Pourcentage des panicules sélectionnées en 2011 pour un critère donné à Kagnan dans la population Ariho x CSM63E dans deux environnements différents

Fréquences et intensités de sélection

Dans chaque parcelle de sélection, entre un et trois hommes et entre zéro et trois femmes ont participé à la sélection, avec une meilleure participation des femmes à partir de 2012 :

- En 2011, 278 panicules ont été sélectionnées, dont 72% par des hommes et 28% par des femmes ;

- En 2012, le nombre de panicules sélectionnées par les hommes et les femmes était plus équilibré : 48% pour les femmes et 52% pour les hommes pour un total de 173 panicules choisies en sélection massale, et les mêmes proportions pour un total de 224 panicules choisies dans 79 lignées S1 en sélection généalogique ;
- En sélection généalogique, 62% des lignées G1 ont été sélectionnées soit par une femme soit par un homme, et 20% des lignées ont été retenues en même temps par au moins une femme et un homme ;
- Le témoin local Ariho a été sélectionné dans quatre des huit essais conduits en 2012, tandis que le témoin amélioré Jakumbé a été sélectionné seulement dans un des huit essais.

Le tableau 5 résume les nombres et fréquences des plantes ou lignées sélectionnées par les producteurs par rapport aux effectifs disponibles pour les deux schémas de sélection, massale (SM) et généalogique (SG). En SM, les producteurs ont en moyenne sélectionné 2.2% des plantes avec une sélection plus sévère sur sols pauvres (en moyenne 1.6% des plantes retenues) que sur sols fertiles (en moyenne 2,8%). En SG, le ratio des lignées sélectionnées par rapport aux lignées conduites est entre 5 et 60%.

Population source	Niveaux de fertilité	SG (Nombre de lignées semées/retenues)		SM (% plantes)	
		2011	2012	2011	2012
ArihoxCSM63E	Pauvre	33	14 (42%)	3,4	1,4
	Fertile	36	16 (44%)	2,8	2,5
Tom10-P3	Pauvre	28	11 (39%)	1,4	1,0
	Fertile	62	14 (23%)	5,3	2,9
Tom10-P4	Pauvre	31	11 (35%)	1,6	1,8
	Fertile	15	9 (60%)	2,8	2,5
PSLo4 N°5/2	Pauvre	17	2 (12%)	1,4	1,1
	Fertile	40	2 (5%)	3,4	0,5

Tableau 5 - Résultats de la sélection généalogique (SG) et sélection massale (SM) conduite à Kagnan et Lénékuy. Le tableau indique le nombre des lignées sélectionnées en 2011 et retenues en 2012 en SG et le pourcentage des plantes retenues dans une population par rapport au total des plantes de la population en 2011 et 2012

Gains de sélection après deux ans de sélection

Dans les essais de 2013, les rendements grains moyens par bloc varient entre 400 kg ha⁻¹ et 2000 kg ha⁻¹ (données non présentées). En moyenne, les rendements à Lénékuy sont deux fois plus élevés qu'à Kagnan (1861 kg ha⁻¹ contre 985 kg ha⁻¹). Les hommes et femmes s'accordent fortement dans leur appréciation des différentes entrées, tel que montré par la valeur du coefficient de corrélation calculé entre les IP des deux catégories (r=0.72 significatif à p<0,001). La figure 3 montre une variation importante des entrées pour la variable IP surtout pour les groupes des lignées (L) et populations (P) et une tendance à préférer les variétés locales témoins (Ariho et Doubirou). Le tableau 6 détaille que 25% des lignées et 30% des populations ont un différentiel de sélection supérieur et significatif pour le rendement (RDM) et la

préférence (IP), respectivement. Cependant, seulement six des 108 lignées et deux des 10 populations testées ont un DS supérieur et significatif pour le deux variables en même temps. La figure 4 souligne également que ces deux variables ne sont pas corrélées (r=0.1).

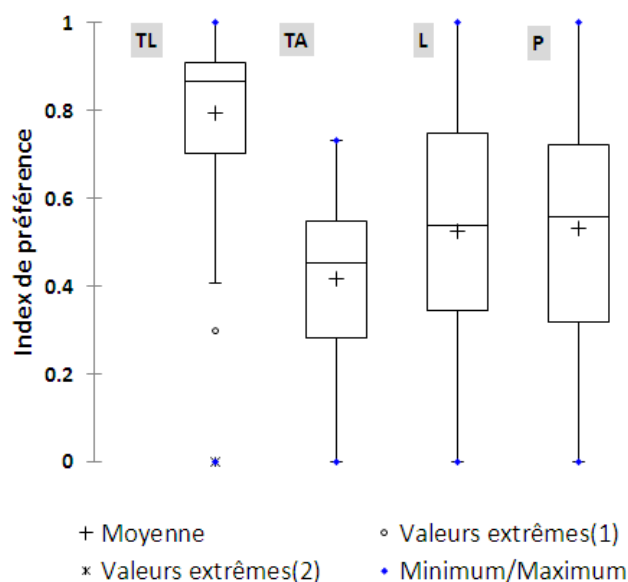


Figure 3 - Variation d'index de préférence (IP) des femmes et hommes calculé à partir des résultats des votes préférentiel des évaluations réalisées dans 24 blocs (essais) à Tominian en 2013. TL=témoins locales, TA=témoin amélioré (CSM63E), L=lignées, P=populations

Sélections	RDM		IP		IP+RDM	
	Effectif	%	Effectif	%	Effectif	%
Lignées (n=108)	27	25	36	33	6	6
Populations (n=10)	3	30	6	60	2	20

Table 6. Nombre et pourcentage de lignées et populations sélectionnées ayant un différentiel de sélection (DS) supérieur significatif pour le rendement en grains (RDM), l'index de préférence (IP) et les deux caractères en même temps

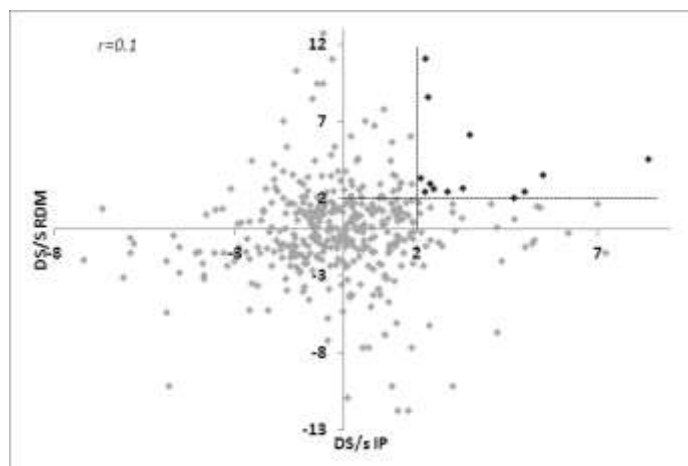


Figure 4. Relation entre la supériorité en rendement grain et la supériorité d'index de préférence des entrées évaluées à Kagnan et Lénékuy à partir des évaluations dans 24 blocs en 2013. Points en gras indiquent des entrées avec un DS/s supérieur et significatif pour les deux caractères RDM

Discussion

Identification des priorités pour un programme de sélection

Cette étude a tout d'abord permis de préciser les priorités des producteurs pour le développement des nouvelles variétés de sorgho adaptées à la zone de Tominian. D'une part,

l'enquête sur les conditions cibles a confirmé l'importance des critères comme la précocité, l'adaptation aux contraintes locales (sécheresse, striga, pauvreté des sols). D'autre part, les évaluations participatives au cours du travail de sélection ont permis d'identifier avec encore plus de précision les critères et préférences recherchés par les hommes et les femmes.

Le grand nombre des critères utilisés par les producteurs pour choisir une variété confirme les observations faites par plusieurs programmes d'amélioration participative du sorgho conduits en Ethiopie (Mulatu et Zelleke, 2002), au Nicaragua (Trouche et al., 2009) et au Burkina Faso (vom Brocke et al., 2010) selon lesquelles une variété doit combiner plusieurs qualités simultanément pour être considérée comme une option intéressante pour leurs systèmes de culture. Dans le cas de ce programme, les critères les plus fréquemment mentionnés sont liés à la qualité de grain, l'adaptation aux contraintes locales et la forme de la panicule. L'importance attribuée à un critère donné peut changer considérablement suivant l'année ou le site de sélection. Les explications possibles de ces divergences peuvent être liées à : 1) la fréquence et l'expression du caractère recherché au sein du matériel évalué ; 2) le profil des évaluateurs (par exemple, une plus grande importance donnée aux qualités organoleptiques des grains en 2012 est probablement une conséquence de la plus grande participation des femmes cette année-là, qui ont porté plus d'attention sur ce critère) ; 3) les conditions environnementales de l'année ; par exemple en 2011, le déficit pluviométrique subi a fortement influencé les choix des producteurs en faveur des plantes très précoces.

Un des principaux critères de sélection utilisés par les producteurs est la ressemblance avec les variétés locales. Ceci confirme le constat fait par Diallo et Weltzien (2010) sur la base de l'évaluation participative d'une diversité de variétés testées à Tominian. Ces auteurs ont trouvé une forte préférence pour les variétés de taille haute avec des panicules lâches ressemblant aux variétés locales. Ce critère de « ressemblance à une variété locale » signifie ici que les producteurs restent très attachés aux caractéristiques morphologiques typiques des sorghos de la race guinée originaires de l'Afrique de Ouest, c'est-à-dire des plantes de taille haute avec des tiges assez souples, des panicules longues, lâches et retombantes, des grains vitreux et des glumes bien ouvertes à maturité. Ces caractéristiques morphologiques des variétés locales sont perçues par les producteurs comme une assurance (garantie) de bonne adaptation et résistance aux contraintes climatiques de la région (humidité, attaques des oiseaux, adaptation aux conditions de faible fertilité) bien que d'autres caractères clé pour l'adaptation au climat comme la sensibilité à la photopériode ne soient pas pris en compte dans leur jugement. Mais il est avéré que des pratiques et des usages du sorgho dépendent étroitement de ces caractéristiques, comme les pratiques de récolte, transport et stockage (les panicules longues avec un pédoncule flexible peuvent être attachées sous formes de bottes et facilement transportées et rangées dans les greniers), la transformation des grains et la préparation des plats, la

construction des nattes et des hangars avec des tiges longues.

Création de variétés productives et adaptées

Le grand nombre de critères de sélection cités pour choisir des plantes dans les populations de sélection, parfois jusqu'à huit critères pour une seule plante montre bien la précision de l'observation des producteurs dans le choix des plantes à sélectionner et donc l'intérêt pour les chercheurs de les impliquer dans le processus de sélection. Les paysans disposent d'une connaissance fine de leur agrosystème et de savoirs techniques élaborés concernant la gestion de leurs cultures (Lavigne-Delville et Wybrecht, 2002). Plusieurs études ont démontré la capacité des producteurs de bien estimer visuellement le potentiel et la stabilité de rendement d'une variété dans leurs propres conditions de production, par des caractéristiques de la panicule ou de la plante entière (Sperling *et al.*, 1996 ; Ceccarelli *et al.*, 2000 ; vom Brocke *et al.*, 2010).

Malgré cette capacité des producteurs d'évaluer la production d'une variété, notre recherche a mis en évidence l'absence de corrélation entre la performance mesurée pour le rendement grains et la préférence par les producteurs évaluateurs. Ceci peut s'expliquer par un manque de différenciation des lignées et populations évaluées en 2013 pour le caractère de rendement, probablement due à hétérogénéité intra-variétale encore élevée, surtout pour les populations. Par exemple, pour un matériel donné, la présence de plantes avec des caractères indésirables entraînera son rejet par les producteurs, même s'il est productif. Une autre explication est que, dans le dispositif d'évaluation utilisé en 2013, les observations de rendement faites pour chacune des lignées et populations testées sont issues d'un seul site et la stabilité de rendement de ce matériel n'a donc pas pu être appréciée. Or, la stabilité de rendement est un critère essentiel dans le choix des producteurs vivant dans des milieux à fortes contraintes agro-climatiques (Sperling *et al.*, 1996 ; Ceccarelli *et al.*, 2000 ; vom Brocke *et al.*, 2010). La capacité d'évaluation multicritère des producteurs peut donc être un atout pour les schémas de sélection où les quantités limitées de semences et de ressources ne permettent pas des tests de rendement multi-locaux à grande échelle dans les premières générations de sélection.

L'intensité de sélection (IS) est un facteur important du gain génétique attendu dans un programme de sélection. Les IS appliquées en 2011 dans les populations sources et en 2012 dans le schéma SM sont de l'ordre de 5% au maximum, ce qui est conforme aux valeurs données dans la littérature (Trouche *et al.*, 2012).

Dans le schéma SG, même si la pression de sélection appliquée par les producteurs a été faible dans certains cas (jusqu'à 60% des lignées retenues), elle a été en moyenne de 34%, ce qui est proche des 15-30% proposés pour cette méthode par plusieurs auteurs (Capettini, 2009 ; Rattunde *et al.*, 2009). Toutefois, dans ce programme, le nombre de plantes sélectionnées a été très variable suivant les conditions d'évaluation et des critères ciblés. Il est possible que dans certaines parcelles de sélection, les producteurs ont

retenu un nombre élevé de plantes en raison d'une faible expression des caractères phénotypiques recherchés ou parce que leur objectif de sélection était large et ciblait plusieurs « idéotypes » en termes d'adaptation et d'usage. On peut aussi supposer que, dans le cas où le phénotype d'une lignée correspond à leurs attentes, les producteurs préfèrent garder un maximum de plantes pour confirmer leur adaptation sous des conditions climatiques différentes à celles de l'année en cours. Mulatu et Zelleke (2002) et vom Brocke *et al.* (2010) ont par exemple montré que des priorités et des critères de sélection diffèrent entre les types ou catégories de producteurs (par exemple entre femmes et hommes).

Gain génétique

Dans un dispositif couvrant une large diversité de conditions du milieu, les différentiels de sélection (DS) calculés permettent de pouvoir comparer les entrées évaluées dans ces différentes conditions et de mettre en relation les observations qualitatives des producteurs et les observations mesurées (rendement) en vue d'une première évaluation de leur valeur globale.

Au vue des performances des lignées et populations pour les caractères évalués, le programme de sélection a été efficace car il a pu produire un nombre assez important des lignées et populations dont au moins un quart s'est montré supérieur à la moyenne de l'essai pour un des deux caractères. Notre recherche indique également qu'il est aussi possible de produire des populations performantes et préférées en utilisant la sélection massale, méthode très simple à gérer dans un schéma de sélection décentralisé. Le nombre des lignées et populations qui présentent en même temps une supériorité significative pour les deux variables (RDM et IP) est cependant relativement bas, notamment pour le cas des lignées. Pour pouvoir accroître cette proportion de lignées « supérieures », plusieurs options sont envisageables : calculer des IP séparément pour les femmes et les hommes, étant donné que même si leur appréciation converge souvent, elle n'est pas totale ($r=0.7$), ou choisir un seuil de sélection moins forte (choix des lignées avec un $DS>1.5$ au lieu de $DS>2$).

Conclusion

Cet article décrit la mise en œuvre d'un programme de création variétale participatif et décentralisé du sorgho au Mali dans un cadre multi-partenarial et donne une première évaluation des résultats atteints après deux cycles de sélection. Ce programme, qui s'est inspiré de l'expérience de plusieurs programmes successifs de sélection participative sur cette culture, apporte cependant plusieurs nouveautés sur le plan de la méthodologie de sélection et des objectifs visés, qui sont : (1) créer des variétés dans un contexte de fortes contraintes agro-climatiques en valorisant des populations sources créées par des programmes antérieurs de sélection participative du sorgho au Burkina Faso ou créées selon la demande des producteurs ; (2) effectuer la sélection avec des producteurs clé et leur famille, chaque famille « gérant son propre programme de sélection » durant plusieurs années consécutives ; et (3) comparer l'efficacité de deux stra-

tégies de sélection participative, à savoir une sélection massive visant à développer des variétés-populations versus une sélection généalogique classique visant à produire des variétés-lignées, pour des environnements de production difficiles. Dès le début, ce programme a intégré une certaine diversité dans les environnements de sélection (sols fertiles et non fertiles, deux terroirs villageois contrastés), l'implication de producteurs hommes et femmes et la prise en compte de nombreux critères de sélection, en vue de produire des variétés pouvant répondre à la diversité des contraintes environnementales, des pratiques et des usages locaux de la zone d'intervention.

Un premier bilan de ce programme indique que les pressions de sélection exercées par les producteurs sélectionneurs (selon les deux stratégies participatives) sont similaires ou moins élevées que celles habituellement appliquées en sélection conventionnelle. L'analyse préliminaire du progrès génétique réalisé selon les deux stratégies participatives suivies révèle des résultats assez positifs, notamment pour la sélection massive. Cette analyse préliminaire soulève de nouvelles questions, notamment sur le choix des dispositifs expérimentaux permettant d'évaluer le plus précocement possible la stabilité de rendement, et le besoin de développer des index de sélection multi-critères.

Remerciements

Les auteurs remercient vivement tous les productrices et producteurs de Kagnan et Lénékuy ayant participé à ce programme de recherche ainsi que le Fond Français pour l'Environnement Mondial (FFEM) et l'Agence Française du développement (AFD) pour leur soutien financier.

Bibliographie

Atlin G. N., Cooper M., Bjørnstad Å., 2001. A comparison of formal and participatory breeding approaches using selection theory. *Euphytica* 122, 463-475

Bazile D., Dembélé S., Soumaré M., Dembele D., 2008. Utilisation de la diversité variétale du sorgho pour valoriser la diversité des sols au Mali. *Cahiers Agricultures* 17, 86-94

Capettini, F., 2009. Selection methods. Part 2: Pedigree method. In: Ceccarelli, S., Guimarães E.P., Weltzien, E. (eds), *Plant breeding and farmer participation*. FAO, Rome, Italy. pp. 223-228

Ceccarelli, S., Grando, S., Tutwiler, R., Baha, J., Martini, A.M., Salahieh, H., Goodchild, A., Michael, M., 2000. A methodological study on participatory barley breeding. I. Selection phase. *Euphytica* 111, 91-104

Commissariat à la Sécurité Alimentaire (CSA) / Projet de Mobilisation des Initiatives en matière de Sécurité Alimentaire au Mali (PROMISAM), 2011. Rapport provisoire de l'étude portant sur la reconnaissance rapide des axes et circuits de commercialisation des céréales au Mali. Région de Ségou. http://fsg.afre.msu.edu/promisam_2/reconnaissance_bassin_Segou.pdf. Consulté le 10 Juin 2014

Diallo, C. et Weltzien, E., 2012. PROMISO – Projet Mil et Sorgho: Préférences des producteurs de la zone de Cinzana et Tominian, Mali, dans leur choix des variétés de sorgho. http://www.fidafrique.net/IMG/pdf/Preferences_des_produc-teurs_de_la_zone_de_Cinzana_et_Tominian_Mali_dans_leu-r_choix_des_varietes_de_sorgho.pdf

Fliedel, G., 1995. Appraisal of sorghum quality for making tô. *Agriculture et développement*. Special Issue - December 1995, 35-45

Guéi, R.G., Bentley, J.W., van Mele, P., 2011. A full granary. In: Van Mele, P., Bentley, J.W. and Guéi, R.G. (eds) *African seed enterprises: Sowing the seeds of food security*. CAB International, Wallingford, U.K. pp. 1-7

Lançon, J., 2001. Pour une conception élargie de la sélection participative. In: Acte d'atelier Hocdé, H., Lançon, J. et Trouche, G. (eds) *La sélection participative: impliquer les utilisateurs dans l'amélioration des plantes*. Montpellier, 5-6 septembre 2001, pp 8-17

Lançon, J., Gallais, A., vom Brocke, K., Djaboutou, M., Hocdé, H., Sekloka, E., Vaksman, M., 2006. Quelles structures variétales pour la sélection participative ? In Lançon J., Floquet A., Weltzien E., (Eds.), *Partenaires pour construire des projets de sélection participative*. Actes de l'atelier de recherche, 14-18 mars 2005, Cotonou, Bénin. Cirad, Inrab, Coopération française, Montpellier, France, pp. 111-123

Lavigne-Delville, P., Wybrecht, B., 2002. Les diagnostics, outils pour le développement. Dans: *Le Mémento de l'agronome*, version 2002. Ed. GRET, CIRAD, Ministère français des affaires étrangères, pp. 27-44

Mulatu, E., Zelleke, H., 2002. Farmers' highland maize (*Zea mays* L.) selection criteria: Implication for maize breeding for the Hararghe highlands of eastern Ethiopia. *Euphytica* 127, 11-30

Rattunde, W.H.F., Weltzien, E., Diallo, B., Diallo, A.G., Sidibé, M., Toure, A.O., Rathore, A., Das, R.R., Leiser, W.L., Toure, A., 2013. Yield of photoperiod-sensitive sorghum hybrids based on guinea-race germplasm under farmers' field conditions in Mali. *Crop Science* 53, 2454-2461.

RuralStruc, 2008. Changements structurels des économies rurales dans la mondialisation. Programme RuralStruc Mali - Phase II. 490p. www.worldbank.org/afr/ruralstruc

Sissoko, S., Doumbia, S., Vaksman, M., Hocdé, H., Bazile, D., Sogoba, B., Kouressy, M., Vom Brocke, K., Coulibaly, M., Touré, A., Dicko, B.G., 2008. Prise en compte des savoirs paysans en matière de choix variétal dans un programme de sélection *Cahiers Agricultures* 17, 128-133

Sperling, L., Loevinsohn, M.E., Ntabomvuras, B., 1993. Rethinking the farmer's role in plant breeding: local bean experts and on station selection in Rwanda. *Experimental Agriculture* 29, 509-419

Trouche, G., Vom Brocke, K., Aguirre, S., Chow, Z., 2009. Giving new sorghum variety options to resource-poor farmers in Nicaragua through participatory variety selection. *Experimental Agriculture* 45, 451-467

Trouche, G., Lançon, J., Aguirre Acuña, S., Castro Briones, B., Thomas, G., 2012. Comparing decentralized participatory breeding with on-station conventional sorghum breeding in Nicaragua: II. Farmer acceptance and index of global value. *Field Crops Research* 126, 70-78

USAID, 2012. A climate trend analysis of Mali. *Famine early warning systems network-informing climate change adaptation series*, 4p.

<http://pubs.usgs.gov/fs/2012/3105/fs2012-3105.pdf>

Vom Brocke, K., Trouche, G., Weltzien, E., Barro-Kondombo, C.P., Gozé, E., Chanterreau, J., 2010. Participatory variety development for sorghum in Burkina Faso: Farmers' selection and farmers' criteria. *Field Crops Research* 119, 183-194

Vom Brocke, K., Trouche, G., Zongo, S., Abdramane, B., Barro-Kondombo, C.P., Weltzien, E., Chanterreau, J., 2008. Création et amélioration de populations de sorgho à base large avec les agriculteurs au Burkina Faso. *Cahiers Agricultures* 17, 146-153

Vom Brocke K., Trouche G., Weltzien E., Kondombo-Barro C.P., Sidibe A., Zougmore R., Gozé E., 2014. Helping farmers adapt to climate and cropping system change through increased access to sorghum genetic resources adapted to prevalent sorghum cropping systems in Burkina Faso. *Experimental Agriculture* 50, 284-305

Weltzien, E. et Christinck, A., 2005. Identifying farmers' needs and preferences for varieties and specific traits. In: Christinck, A., Weltzien, E., Hoffmann V., (eds) *Setting breeding objectives and developing seed systems with farmers. A handbook for practical use in participatory plant breeding projects.* Margraf Publishers GmbH, Scientific Books, Weikersheim, Germany

Weltzien, E., Christinck, A., Touré, A., Rattunde, F., Diarra, M., Sangaré, A., Coulibaly, M., 2007. Enhancing farmers' access to sorghum varieties through scaling-up participatory plant breeding in Mali, West Africa. In Almekinders C. and Hardon J. (Eds.). *Bringing Farmers Back into Breeding. Experiences with Participatory Plant Breeding and Challenges for Institutionalisation.* Agromisa Special 5, Agromisa Wageningen pp. 58-69

Weltzien, E., vom Brocke K., Rattunde, F., 2005. Planing plant breeding activities with farmers. In: Christinck, A., Weltzien, E., Hoffmann V., (eds) *Setting Breeding Objectives and Developing Seed Systems with farmers. A Handbook for Practical Use in Participatory Plant Breeding Projects.* Margraf Publishers GmbH, Scientific Books, Weikersheim, Germany.

Mobiliser la diversité génétique pour un choix variétal plus large ; blocages et opportunités en agromonie et génétique

Claire BILLOT^{1*} - Christian LECLERC¹
Sélim LOUAFI¹ - Adeline BARNAUD²
Xavier PERRIER¹

¹UMR AGAP, Cirad, France

²UMR DIADE, IRD, France et LMI LAPSE, LNRPV, Dakar, Sénégal

*Auteur correspondant : claire.billot@cirad.fr

Introduction

Les objectifs assignés aux systèmes de culture ne peuvent se limiter à la recherche unique d'une production accrue, comme privilégiée par la Révolution Verte, voire quelque fois à des produits de meilleure qualité organoleptique. Ils incluent également et, de plus en plus, les services éco-systémiques et des fonctions de durabilité au sens large. Cela concerne notamment la gestion dynamique de la diversité allant des plantes cultivées jusqu'à l'écosystème dans son ensemble. Les enjeux sont tels qu'il faut dépasser les oppositions entre conservation *ex situ* et *in situ* et penser différemment les pratiques et les processus d'amélioration des plantes (Ahmadi *et al.*, 2013).

Ruptures technologiques et juridiques dans le secteur de l'amélioration des plantes

L'accroissement sans précédent de la connaissance des génomes, grâce aux pouvoirs de résolution apportés par les différentes techniques de séquençage, mais aussi des capacités de phénotypage, permet une caractérisation très fine des variations au sein des espèces cultivées et le long de leur génome. Ces évolutions techniques, mais aussi l'apparition de nouveaux cadres juridiques, l'importance prise par la recherche privée en amélioration des plantes et le recul concomitant de la recherche publique, bousculent en profondeur la manière de mobiliser et de valoriser les ressources variétales. Pourtant, tout se passe comme si les modèles de gestion des ressources génétiques et d'amélioration variétale restaient inchangés.

Ainsi, une récente tribune d'opinion publiée dans *Nature* (McCouch *et al.*, 2013) montre que les critères qui ont servi à penser la Révolution Verte continuent à guider les pratiques d'innovation variétale, en dépit des limites maintes fois reconnues à ce modèle. Cette tribune, intitulée « Feeding the future » en référence au grand programme américain sur la sécurité alimentaire,

souligne et rappelle de manière opportune l'urgence de tirer avantage du potentiel offert par la diversité génétique pour répondre au défi de la sécurité alimentaire dans le monde. Dans ce texte, la mobilisation des ressources génétiques reste toutefois associée à une finalité principale d'accroissement de rendements, la diversité considérée est uniquement celle qui est disponible dans les banques de gènes, et les outils à mettre en œuvre pour l'exploiter sont fournis par les nouvelles possibilités technologiques de la génomique, arguments déjà avancés précédemment sans grand succès.

Cette tribune est ainsi emblématique des difficultés à tirer toutes les conséquences des nouveaux contextes et enjeux dans lesquels les bénéfices potentiels de l'amélioration des plantes sont amenés à s'exprimer, et en amont, des nouvelles modalités qui permettent de mobiliser la diversité pour répondre aux défis de la sécurité alimentaire. En restant prisonnier des anciens schémas, les risques sont grands de laisser à nouveau de côté une diversité importante (celle qui n'est pas contenue dans les banques de gènes) et de reproduire les erreurs qui dans le passé ont conduit à des échecs, au développement d'inégalités importantes (choix de plantes et d'agrosystèmes cibles peu variés) et des crispations politiques, contre-productives par rapport à l'objectif recherché (Louafi *et al.*, 2013). Un changement de paradigme dans les façons d'aborder la conservation et l'utilisation de la diversité variétale est nécessaire et urgent, en intégrant aux dimensions biologiques et génétiques, les dimensions sociales et culturelles (de Boef *et al.*, 2013).

Une conservation des ressources génétiques de moins en moins adaptée aux enjeux réels de la sécurité alimentaire

Tout d'abord, il convient de souligner que, malgré des références désormais omniprésentes à l'agriculture durable, à la résilience, ou encore à la qualité nutritionnelle, la sécurité alimentaire reste encore trop souvent pensée essentiellement à travers l'accroissement de rendements. Cette réduction des enjeux de sécurité alimentaire aux aspects de production alimentaire (associés à l'accroissement démographique mondial) masque en réalité d'autres dimensions, non moins essentielles, telles que la stabilité des rendements face à des conditions changeantes, l'accessibilité à l'alimentation par un accroissement des revenus et la création d'emplois, ou encore la qualité nutritionnelle. Ce sont là autant d'objectifs indispensables pour atteindre la sécurité alimentaire, en particulier dans des milieux moins maîtrisés et moins homogènes où les plantes et les pratiques sont diverses, mais efficaces, et où l'accroissement des rendements n'est pas l'objectif premier (Hainzelin, 2013 ; Jarvis *et al.*, 2007).

Dans ce contexte, exploiter le potentiel de la biodiversité pour nourrir le monde ne peut pas reposer sur la seule diversité génétique contenue dans les banques de gènes (Brush, 1989). Ces collections sont cruciales et doivent continuer à bénéficier de toute l'attention requise pour la conservation, mais ne peuvent prétendre représenter la totalité de la diversité génétique mobilisable, et encore moins la

diversité des pratiques, des usages, des savoirs, que l'on ne peut dissocier des plantes cultivées, puisque ceux-ci n'ont été que très rarement renseignés. Sachant qu'une seule communauté paysanne peut à elle seule cultiver plusieurs dizaines de variétés (Jarvis 2008), et que les prospections sont toujours partielles (Pernes, 1984), il est certain que la diversité génétique stockée dans les banques de gènes n'est pas complètement représentative de la diversité des plantes cultivées, et encore moins de celle des plantes sauvages apparentées. En effet, les efforts de conservation *ex situ* ont été essentiellement concentrés sur les espèces agronomiques majeures considérées par la FAO comme indispensables pour la sécurité alimentaire et sur lesquelles, dans la logique de la révolution verte, se concentrent la quasi-totalité des efforts de recherche et d'amélioration (Louafi et al., 2013). Si cette stratégie a permis de sortir de l'insécurité alimentaire des pans entiers de la population mondiale, elle n'a pas eu l'effet escompté sur plusieurs zones du globe où sévissent encore des problèmes de sécurité alimentaire.

Les banques de gènes ne sont pas non plus toujours appropriées pour conserver toutes les espèces cultivées. Les modalités de conservation sont déterminées par la nature biologique des espèces et organes conservés (graines ou tubercules), et par leur mode de reproduction (sexuées ou clonale), et les différents types de conservation sont coûteux. Par nature, la régénération des accessions non fixées conservées en banque de gènes, est soumise à la dérive génétique. De plus, les pressions de sélection rencontrées ne sont plus celles des sites de collecte. Enfin, alors qu'on conserve du matériel déconnecté de son site d'origine, et qu'on considère qu'il représente la diversité rencontrée sur celui-ci, les agriculteurs poursuivent le processus adaptatif et créent des associations alléliques pertinentes. Celles-ci n'existent pas dans les banques de gènes. Dans ce contexte, il est difficile de s'appuyer uniquement sur le matériel conservé *ex-situ* pour relever les défis globaux, notamment en termes d'adaptation au changement climatique.

Prétendre dans ces conditions que la mobilisation de la diversité biologique pour accroître le choix variétal doit s'appuyer sur les collections déjà constituées n'est pas suffisant ni même satisfaisant pour réduire l'insécurité alimentaire.

Soutenir une gestion plus intégrée et dynamique

Même à considérer que la diversité des allèles les plus fréquents est présente dans les collections *ex situ*, la question reste posée pour des allèles rares, absents des collections. De plus, les stratégies d'échantillonnage à l'origine des collections n'ont pas considéré, ou insuffisamment, la variabilité des environnements, ces collections ne peuvent donc pas être analysées en termes d'adaptations ni étayer les connaissances les plus récentes sur le fonctionnement des génomes. Il est ainsi utopique de penser que, appliqué à des collections que l'on sait partielles, la génomique ou la génétique permettront de construire à elles-seules les assemblages de gènes les plus favorables. Cette limite s'applique de manière générale pour tous les caractères dont on sait le déterminisme complexe, impliquant des gènes en réseau et

en régulation fine, et plus directement encore aux espèces dont la domestication a entraîné une forte diminution de la variabilité génétique et pour lesquelles il est nécessaire d'effectuer un retour vers le compartiment sauvage originel. La diversité des processus passés et en cours, et leurs interactions, nous obligent à reconnaître la nécessaire complémentarité entre conservation *ex situ* et gestion *in situ*. Les ressources génétiques sont des ressources vivantes participant d'une évolution dynamique où les sélections opérées par des agriculteurs, la nouvelle diversité issue des programmes de sélection, et les pressions environnementales au sens large doivent être prises en compte conjointement.

L'association des agriculteurs aux efforts de mobilisation de la diversité revêt un caractère crucial dans les zones marginalisées où une très forte proportion de semences est auto-produite. Les variétés sont nommées, échangées et transmises comme un objet culturel autant que biologique au fil des générations. Sur un pas de temps plus long, les semences et variétés suivent également les agriculteurs dans leurs migrations. Par conséquent, les ressources génétiques sont non seulement caractérisées par leurs propriétés biologiques et génétiques, l'association avec des caractéristiques environnementales, mais également par leurs dimensions socio-culturelles et historiques. Dit autrement, les ressources génétiques n'existent pas en elles-mêmes, c'est-à-dire indépendamment de leur utilisation, elles co-évoluent avec les sociétés. Elles doivent donc aussi être définies, et donc documentées et caractérisées en référence à des personnes et des sociétés qui les cultivent, les utilisent et les croisent, ainsi qu'à des contextes environnementaux liés à leurs usages. Les interactions GxE que les sélectionneurs ont l'habitude de considérer doivent être remplacées par une triple interaction GExS, où S représente les composantes sociales qui sont rarement prises en compte, alors même qu'il s'agit de plantes cultivées donc façonnées par l'homme (Leclerc et Coppens d'Eeckenbrugge, 2012). Le génotypage à haut débit de milliers d'accessions permis par les nouvelles technologies de séquençage ouvre indéniablement de nouvelles perspectives de mobilisation de la diversité présente dans les banques de gènes. Mais celle-ci sera d'autant plus efficace et pertinente qu'elle parviendra à intégrer des éléments liés à leurs usages et utilisation, aussi bien par les agriculteurs que les sélectionneurs. Cette dimension, aujourd'hui quasi-absente des informations accessibles dans les banques de gènes (voire même supprimée lors de certaines conversions de banques de gènes), doit être renforcée, même si leur coût semble prohibitif.

De récentes initiatives, développées dans quelques projets de recherche pris dans notre environnement proche⁴² tendent à considérer les cultures comme faisant partie d'un agroécosystème à prendre en compte dans sa globalité. Même si quelques espèces cultivées assurent de manière quantitative la sécurité alimentaire (le blé, le maïs et le riz assurent plus de 50 % des apports énergétiques végétaux), celle-ci est de fait assurée par des associations complexes.

⁴² ARCAD - Crop Biodiversity Research and Ressource Center, Agropolis Fondation ; WAAPP - West Africa Agricultural Productivity Program sur le fonio ou le mil ; PlantaDiv - Evolution de la diversité des ressources génétiques domestiquées dans le bassin du lac Tchad, Projet ANR ; AfriCrop - Etude de l'histoire évolutive des plantes domestiquées africaines, Projet ANR ; Picrevat - Amélioration des prévisions climatiques pour l'agriculture, Projet ANR ; ...

En considérant cette complexité, le rôle des espèces jusqu'à qualifiées de mineures, parce que sous-étudiées doit être clarifié. C'est par exemple le cas du fonio, pour lequel des études de diversité concilient une perspective de gestion intégrée et dynamique et les nouvelles technologies (Barnaud et Billot, 2011 ; Barnaud et al., 2012). Cette céréale à petits grains, dont la composition en acides aminés est bien équilibrée, est cultivée et consommée dans la région subsaharienne d'Afrique de l'Ouest, du lac Tchad au Sénégal. La durée du cycle de vie varie selon les variétés. Ainsi, les variétés à cycle court dont les grains sont matures avant la fin de la saison des pluies permettent d'assurer la période de soudure, alors que les variétés à cycle long, qui présentent souvent un rendement plus important, sont utilisées à la fois pour la consommation et le commerce. Leur culture répond donc aux besoins spécifiques des agriculteurs.

Les chercheurs de l'Unité AGAP (Amélioration Génétique et Adaptation des Plantes méditerranéennes et tropicales) de Montpellier ont réalisé une étude originale montrant comment les sociétés favorisent l'adaptation des plantes au changement climatique (Mwongera et al., 2014). Ils ont comparé deux communautés de migrants le long des pentes du Mont Kenya : sous l'effet de pressions démographiques, les Tharaka qui se sont déplacés des zones plus sèches vers des zones plus humides en remontant de 750 m à 950 m d'altitude, et les Mwimbi, qui sont au contraire descendus de 1100 m vers des zones plus sèches. L'adaptation des plantes des deux communautés qui vivent aujourd'hui dans un environnement commun est significativement différente : les fontes de semis sont plus importantes pour les Mwimbi que pour les Tharaka. Ces derniers, historiquement plus familiers avec les sécheresses de basse altitude, disposent de ressources génétiques mieux adaptées en profitant des échanges des semences avec leurs alliés demeurés dans les zones sèches. Un processus social d'adaptation des plantes aux changements climatiques opère ainsi à travers le cloisonnement social des systèmes d'échanges de semences (Labeyrie et al., 2013, 2014).

Conclusion : repenser le cadre socio-politique de la gestion des ressources génétiques

La complémentarité entre la gestion *ex situ* et *in situ* recouvre une dimension socio-politique cruciale, notamment en ce qui concerne la manière dont les résultats de la recherche et les produits qui en sont issus sont gérés et mis à disposition. Les contraintes juridiques et politiques de plus en plus fortes liées à l'accès et aux échanges de ressources génétiques ainsi que les aspects liés à la propriété intellectuelle obligent à reconsidérer les conditions partenariales avec l'ensemble des acteurs qui revendiquent un rôle dans la mise à disposition de cette diversité par leurs efforts passés, actuels et futurs. Les choix techniques et institutionnels faits par les chercheurs et les gestionnaires de banques de gènes à l'égard de questions telles que la participation des agriculteurs, dans toutes les formes et à toutes les étapes possibles, l'utilisation des droits de propriété intellectuelle, le renforcement des capacités et la formation, le transfert de technologie, ou encore le partage d'information ne sont

pas neutres sur la capacité à mobiliser la diversité génétique dans l'avenir.

Un changement de paradigme dans la manière dont la conservation et l'utilisation de la diversité génétique sont abordées est donc nécessaire. Nous avons maintenant les moyens de proposer une approche plus fine et véritablement interdisciplinaire des objectifs de conservation et d'utilisation durable de la biodiversité. La recherche sur les ressources génétiques peut être adaptée en fonction de l'échelle d'intervention (local, régional, Nord / Sud, mondial), le niveau social de gestion (individus, les sociétés humaines, l'humanité) et les niveaux socio-économiques (l'autosubsistance, le revenu des particuliers, le marché local, le commerce mondial). L'augmentation de la durabilité des systèmes de production agricole actuels nécessite donc une approche de gestion des ressources génétiques qui soit dynamique (c'est à dire avec une interaction constante entre matériel *ex situ* et *in situ*) et intégrée (impliquant des dimensions sociales, culturelles, écologiques et biologiques).

Bibliographie

- Ahmadi, N., Bertrand, B., Glaszmann, J.-C., 2013. Repenser l'amélioration, In : Hainzelin, E. (Ed.), *Cultiver la biodiversité pour transformer l'agriculture*, Versailles, Quae, 99-146
- Barnaud, A., Billot, C., 2011. Atelier International "De la connaissance à la valorisation du fonio", *Cahiers Agricultures*, 20, 310-312
- Barnaud, A., Vignes, H., Risterucci, A.-M., Noyer, J.-L., Pham, J.-L., Blay, C., Buiron, M., Vigouroux, Y., Billot, C., 2012. Development of nuclear microsatellite markers for the fonio, *Digitaria exilis* (Poaceae), an understudied West African cereal, *American Journal of Botany*, 99, e105-e107
- Brush, S.B., 1989. Rethinking crop genetic resources conservation. *Conservation Biology*, 3, 19-29
- De Boef, W.S., Thijssen, M., Subedi, A., 2013. New professionalism and governance in plant genetic resources, in de Boef, W.S., Peroni, N., Subedi, A., Thijssen, M., O'Keeffe, E. (Eds), *Community biodiversity management: promoting resilience and the conservation of plant genetic resources*, London and New-York, Earthscan, 353-364
- Hainzelin, E. (Ed), 2013. *Cultiver la biodiversité pour transformer l'agriculture*, Versailles, Quae
- Jarvis, D.I., Padoch, C., Cooper H.D., 2007. *Managing biodiversity in agricultural ecosystems*, New York, Columbia University Press Book
- Jarvis, D.I., Brown, A.H.D., Cuong, P.H., Collado-Panduro, L., Latournerie-Moreno, L., Gyawali, S., Tanto, T., Sawadogo, M., Mar, I., Sadiki, M., Thi-Ngoc Hue, N., Arias-Reyes, L., Balma, D., Bajracharya, J., Castillo, F., Rijal, D., Belqadi, L., Rana, R., Saidi, S., Ouedraogo, J., Zangre, R., Rhrib, K., Chavez, J.L., Schoen, D., Sthapit, B., De Santis, P., Fadda, C., Hodgkin, T., 2008. A global perspective of the richness and evenness of traditional crop-variety diversity maintained by farming communities, *Proceeding of the National Academy of Sciences of the USA*, 105, 5326-5331

Kloppenburger, J., 1988. *First the Seed: The political economy of plant biotechnology*, Cambridge, Cambridge University Press

Labeyrie, V., Rono, B., Leclerc, C., 2013. How social organization shapes crop diversity: an ecological anthropology approach among Tharaka farmers in Kenya. *Agriculture and Human Values*. 31, 97-107

Labeyrie, V., Deu, M., Barnaud, A., Calatayud, C., Buiron, M., Wambugu, P., Manel, S., Glaszmann, J.-C., Leclerc, C., 2014. Influence of ethnolinguistic diversity on the Sorghum genetic patterns in subsistence farming systems in Eastern Kenya, *PLoS ONE* 9(3): e92178. doi:10.1371/journal.pone.0092178

Leclerc, C., Coppens d'Eeckenbrugge, G., 2012. Social organization of crop genetic diversity, the G x E x S interaction model, *Diversity*, 4, 1-32

Louafi, S., Bazile, D., Noyer, J.-L., 2013. Conserver et cultiver la diversité génétique agricole : aller au-delà des clivages établis. In : Hainzelin E. (Ed), *Cultiver la biodiversité pour transformer l'agriculture*. Versailles, Quae, 185-222

McCouch, S., Baute, G.J., Bradeen, J., Bramel, P., Bretting, P.K., Buckler, E., Burke, J.M., Charest, D., Cloutier, S., Cole, G., Dempewolf, H., Dingkuhn, M., Feuillet, C., Gepts, P., Gratapaglia, D., Guarino, L., Jackson, S., Knapp, S., Langridge, P., Lawton-Rauh, A., Lijua, Q., Lusty, C., Michael, T., Myles, S., Naito, K., Nelson, R.L., Pontarollo, R., Richards, C.M., Rieseberg, L., Ross-Ibarra, J., Rounsley, S., Hamilton, R.S., Schurr, U., Stein, N., Tomooka, N., van der Knaap, E., van Tassel, D., Toll, J., Valls, J., Varshney, R.K., Ward, J., Waugh, R., Wenzl, P., Zamir, D., 2013. Agriculture: Feeding the future, *Nature*, 499, 23-24

Mwongera, C., Boyard-Micheau, J., Baron, C., Leclerc, C., 2014. Social Process of Adaptation to Environmental Changes: How Eastern African Societies Intervene between Crops and Climate. *Weather Climate and Society*. doi:10.1175/WCAS-D-13-00034.1

Pernes, J., 1984. *Gestion des ressources génétiques des plantes*, Paris, Lavoisier.

Annexe

Appel à contribution de la revue *Agronomie, Environnement & Sociétés* - Volume 4 - Numéro 2 : Variétés et systèmes de culture : quelle co-évolution ? Quelles implications pour l'agronomie et la génétique ?

Didier BAZILE - Valentin BEAUVAL
Thierry DORÉ - Marie-Hélène JEUFFROY Xavier
PINOCHET - Olivier RÉCHAUCHÈRE

Le raisonnement de l'évolution des systèmes de culture est au cœur de l'agronomie. Il repose sur des connaissances relatives au fonctionnement des agro-écosystèmes, des méthodes pour concevoir des systèmes répondant à de nouveaux enjeux, des outils pour piloter ces systèmes de culture en fonction d'objectifs variés. Il repose également sur l'évaluation de leurs performances, permettant de raisonner leur insertion dans des systèmes à d'autres échelles (exploitation agricole, filières, territoires...) et de réfléchir les politiques publiques susceptibles d'en infléchir ou d'en orienter les trajectoires d'évolution.

Le choix variétal (qui suppose l'accès aux semences) est un élément essentiel du système de culture. Depuis l'après-guerre, l'évolution des variétés et celle des systèmes de culture se sont faites en synergie. Sur le plan variétal, la modernisation agricole dans les pays du Nord aussi bien que la révolution verte dans les pays du Sud ont reposé sur la diffusion de variétés à hauts rendements (réduction de la taille, meilleure valorisation du rayonnement lumineux, etc.). Ces modes d'intensification de l'agriculture ont bien fonctionné dans les modèles d'agriculture conventionnelle d'Europe et d'Asie ou encore pour les plantations d'Afrique intertropicale, car elles allaient de pair avec une élimination des facteurs limitants (apports élevés d'intrants, irrigation, etc.). A contrario, le modèle agricole issu de la Révolution verte n'a pas fonctionné en Afrique subsaharienne du fait de la persistance de facteurs biotiques et abiotiques limitants et d'une non adéquation avec les pratiques agricoles locales. Par ailleurs, en France, la modernisation agricole doit aujourd'hui faire face à des défis importants (économiques, écologiques et sociaux). Cela a contribué à redéfinir les objectifs assignés aux systèmes de culture en intégrant notamment des finalités de qualité renouvelées ou retrouvées, et progressivement davantage de finalités de nature environnementale (qu'il

s'agisse de respect de normes comme celles relatives à la qualité de l'eau et à son utilisation raisonnée, à la préservation de la biodiversité, ou des services rendus par les agro-écosystèmes). La sélection de variétés plus rustiques ou défi-

nies sur des aspects qualité (ex. valeur boulangère des blés) correspond à la première réponse donnée par les sélectionneurs à cette nouvelle demande sociétale. Les nombreux progrès accomplis en biologie moléculaire et en génétique servent aujourd'hui ce renouveau de l'amélioration variétale. Une meilleure caractérisation des accessions des collections ex situ permet de cibler les recherches vers certains gènes dits d'intérêt et une sélection assistée par marqueurs permet au sélectionneur de gagner un grand nombre d'années pour sa sortie variétale.

De plus, de nouveaux enjeux émergent. Concernant la propriété intellectuelle, le certificat d'obtention végétal (COV) est progressivement remis en cause par l'émergence du droit des brevets, qui remet en cause le principe de libre accès aux variétés existantes comme ressource génétique pour la création des futures variétés. Le COV et le droit des brevets impliquent également des contradictions, à des degrés divers, avec le droit des agriculteurs. Par ailleurs, l'implication dans des programmes de sélection participative de chercheurs des centres de la recherche publique (Cirad, Inra) amène une nouvelle réflexion sur la construction collective des variétés et sur la structure génétique de celles-ci qui ne repose plus nécessairement sur les principes de distinction, homogénéité et stabilité comme c'est le cas pour les variétés protégées par le COV. Au niveau mondial, différents systèmes se mettent en place tant pour permettre l'accès aux ressources génétiques et à la dynamique évolutive des espèces cultivées pour la production agricole et l'innovation (différents types de catalogues de variétés, *Open Source Seed License*, etc.), que pour garantir un accès à des semences de qualité pour les paysans (cf. Système FAO de Semences de qualité déclarée).

Dans ce numéro, on souhaite aborder notamment les questions suivantes :

1 - Objectifs de production et variétés

Compte tenu des objectifs assignés aux systèmes de culture, que sait-on de ce que peuvent apporter les variétés ? Il s'agit là de discuter des objectifs de sélection en rapport avec les finalités des systèmes de culture. Quelles sont les gammes de variation de performance existantes pour différents critères (productivité, qualité, résistance aux bioagresseurs, qualité liée au procédé de transformation ou à la conservation, efficience d'utilisation des facteurs), et pour différentes combinaisons de ces critères ? En quoi et jusqu'où l'empilement de critères dans un même génotype est-il possible ? Comment les associations variétales offrent-elles une autre réponse possible ? En quoi les perspectives sont-elles différentes si on raisonne à l'échelle d'un pays ou à l'échelle d'un terroir ?

2 - Explorer la relation Génotype x Environnement

Quels degrés de liberté supplémentaires pour atteindre des objectifs sont-ils offerts par la meilleure connaissance de ce que sont les Interactions Génotype x Environnement ? Ces interactions GxE se déclinent aujourd'hui sur un plan technique par GxExConduite (IGEC) et par GxExSociété (GES) pour considérer davantage la diversité des pratiques agricoles. On sait que les travaux sur les IGEC et les GES se sont développés au cours des quinze dernières années. Présen-

tent-elles des limites biologiques ? Quels avantages et inconvénients leur prise en compte dans le choix des variétés et des systèmes de culture présente-t-elle sur les plans techniques, sociaux, organisationnels, économiques, culturels ? Leur intégration dans les modèles de culture utilisés pour concevoir des systèmes de culture est-elle une perspective ?

3 - Quelles perspectives offre la prise en compte des aspects spatio-temporels de la diversité génétique ?

Le raisonnement spatio-temporel de la diversité génétique offre-t-il des opportunités compatibles avec la gestion des systèmes de culture et des filières ? Le raisonnement d'une plus grande diversité génétique à différentes échelles spatiales (parcellaire, sur des territoires de différentes tailles) semble être un moyen d'amplifier par des effets synergiques ce que portent une à une les variétés (particulièrement dans le cadre de la résistance aux maladies). La gestion de la diversité génétique doit-elle, peut-elle, se limiter aux espèces végétales cultivées ? Quel nouveau regard est-il possible de porter sur la biodiversité pour l'intégrer dans de nouvelles associations de cultures en meilleure synergie avec leur environnement ?

4 - Quel potentiel des nouvelles biotechnologies ?

En quoi les nouvelles connaissances biologiques appuyées sur des développements technologiques offrent-elles de nouvelles perspectives de sélection valorisables pour une évolution des systèmes de culture ? Il s'agit d'identifier si les nouvelles connaissances biologiques, au-delà de leur intérêt pour la sélection, permettent d'entrevoir des moyens de lever certains verrous dans les systèmes de culture (grâce notamment à une meilleure résistance à des stress biotiques ou abiotiques permettant de décaler des cycles de culture, de modifier des densités de plantation, etc.).

5 - Quel potentiel de modèles alternatifs d'amélioration des plantes ?

A des échelles locales, régionales et nationales, se développent les pratiques de sélection participative, qui peuvent être un moyen de mieux intégrer les savoirs locaux et les savoirs scientifiques dans la gestion dynamique d'une diversité génétique. Les variétés issues de ces pratiques de sélection permettent-elles une évolution des conduites des cultures ? Présentent-elles notamment une meilleure adaptation aux conditions climatiques dans lesquelles elles ont été sélectionnées ? Une meilleure résistance à des stress biotiques ou abiotiques ? Existe-t-il des obstacles techniques ou organisationnels à la mise en œuvre de cette nouvelle amélioration des plantes, notamment en termes de reconnaissance des variétés produites en sélection participative et à leur circulation entre agriculteurs, et si oui comment les dépasser ? Existe-t-il des limites spatiales et organisationnelles à une sélection participative, et à l'atteinte de ses objectifs ?

L'objectif du numéro est de réfléchir entre agronomes et généticiens sur ces questions, en balayant la gamme des préoccupations que peuvent être celles des différents métiers d'agronomes. Tous les types de systèmes de culture et tous les biotopes sont *a priori* concernés.

Notes de lecture

La palme des controverses : Palmier à huile et enjeux de développement - Auteurs : Alain RIVAL & Patrice LEVANG - Éditions QUAE, 2013

Thierry DORÉ

Cet ouvrage petit par le volume mais grand par la qualité des informations qu'il contient a été rédigé par deux spécialistes du palmier à huile. Leurs expertises combinées permettent de comprendre les phénomènes biologiques et les jeux d'acteurs qui alimentent la controverse sur l'huile de palme. Si cette controverse demeure, expliquent les auteurs, c'est bien parce que des acteurs y défendent des intérêts divergents, mais aussi parce que l'élaéculture a de fait des conséquences ambivalentes : facteur de développement potentiel et approvisionnement mondial performant en huile végétale d'un côté, mais culture dont les modes de mise en place sont parfois générateurs de drames sociaux, et de dégâts écologiques et environnementaux, de l'autre.

Une certitude semble se dégager de l'ouvrage, celle que la production d'huile de palme va se poursuivre, quelles que soient les campagnes d'opinion qui la visent dans les pays du Nord - qui ne consomment que 15% de la production mondiale. L'adoption la plus rapide possible de modes d'implantation, de production, de transformation et de distribution respectueux de critères sociaux et environnementaux est donc un impératif. Les auteurs montrent que cette adoption passe par des mesures politiques et réglementaires fortes, au niveau international, ainsi qu'au niveau des Etats producteurs, mais aussi par des avancées sur le plan technique.

Quelle peut être la contribution de l'agronomie et de l'amélioration variétale à la transformation des modes de production ? Si on suit A. Rival et P. Levang, les objectifs sont triples. Tout d'abord il faut accompagner le maintien et l'évolution des systèmes agroforestiers à palmier qui perdurent sous des formes très variées, en particulier dans la région d'origine de la plante et de la culture, à savoir le bassin du Congo. Par ailleurs, il faut parvenir à accroître le rendement des plantations existantes, sans engendrer d'externalité

environnementale négative, afin de faire face à l'augmentation de la demande en huiles végétales sans trop contribuer à la défriche de forêts primaires. Enfin, si des plantations de défriche doivent avoir lieu, il s'agit de déterminer à quels endroits elles doivent être mises en place, et selon quelles structures paysagères, pour produire tout en préservant au maximum la biodiversité. Si cette dernière finalité concerne a priori peu les interactions entre l'amélioration des plantes et l'agronomie, ce n'est à l'évidence pas le cas pour les deux premières.

Les deux auteurs (mais ce n'était pas leur objet) sont peu disert sur cette interaction entre agronomie et amélioration des plantes. C'est dommage pour nous, car on est donc sur une production présentant des facettes multiples, et pour laquelle les objectifs varient selon les régions et les types de plantation ; avec en face une recherche en amélioration des plantes structurée en réseau international et appuyée sur les biotechnologies (clonage en particulier). On comprend que cette structuration est très fructueuse pour traiter la question de l'adaptation des variétés aux problématiques locales, quand il s'agit de mettre en commun le matériel génétique pour contrer les principaux problèmes sanitaires, différents en Asie, en Afrique et en Amérique du Sud. La mise en commun permet ainsi de disposer d'un arsenal de gènes de résistance plus vaste, débouchant sur des assemblages plus efficaces. Mais cette structuration l'est-elle également quand il s'agit de contribuer à satisfaire des objectifs locaux contrastés - intensification de palmeraies monospécifiques versus maintien de caractéristiques favorables aux systèmes agroforestiers paysans ? La question est d'autant plus intéressante que le palmier à huile est une plante pérenne, et que les programmes de sélection doivent tenir compte de cette dimension temporelle.

Mais on ne saurait reprocher aux auteurs, dont l'ouvrage synthétique embrasse très large, de ne pas s'être focalisé sur cette question ! Leur production est d'une manière générale très éclairante, et sur la problématique des interactions agronomie/amélioration des plantes, aiguise heureusement la curiosité.

Texte hors thématique du numéro

Les « carnets de plaine » des agriculteurs : une source d'information sur l'usage des pesticides à l'échelle de bassins versants ?

Farmers' "land management logbooks": a source of information on pesticides use at the watershed scale?

Céline SCHOTT^{(1)*}, Fabienne BARATAUD⁽²⁾, Catherine MIGNOLET⁽³⁾

^{(1)*}Ingénieure d'Etudes - INRA-SAD / Unité ASTER (Agro-Systèmes, Territoires, Ressources) - 662, avenue Louis Buffet - 88500 Mirecourt - France
Courriel : schott@mirecourt.inra.fr - Tel +33 (0)3 29 38 55 03 / Fax +33 (0)3 29 38 55 19

⁽²⁾Ingénieure de Recherche - INRA-SAD / Unité ASTER (Agro-Systèmes, Territoires, Ressources) - 662, avenue Louis Buffet 88500 Mirecourt - France
Courriel : mignolet@mirecourt.inra.fr - Tel +33 (0)3 29 38 55 10 / Fax +33 (0)3 29 38 55 19

⁽³⁾ Ingénieure de Recherche - INRA-SAD / Unité ASTER (Agro-Systèmes, Territoires, Ressources) - 662, avenue Louis Buffet 88500 Mirecourt - France
Courriel : barataud@mirecourt.inra.fr - Tel +33 (0)3 29 38 55 10 / Fax +33 (0)3 29 38 55 19

Résumé

L'analyse de près de 3000 fiches parcellaires sur le bassin versant de l'Orgeval (77) entre 1990 et 2009 a permis d'estimer l'évolution de la pression phytosanitaire totale exercée sur ce territoire et de reconstituer l'évolution de l'usage des pesticides sur deux cultures majeures (blé et maïs). Le calcul de différents indicateurs basés sur les pratiques agricoles révèle d'un côté une réduction des quantités de matières actives totales apportées à l'échelle du bassin versant, mais de l'autre une diversification des molécules utilisées qui traduit le maintien d'une forte dépendance des systèmes de culture aux traitements phytosanitaires, en particulier herbicides. Malgré leur richesse, ces informations enregistrées par les agriculteurs présentent des limites en termes d'accessibilité et de représentativité qui sont à prendre en considération lorsque l'on cherche à évaluer l'évolution de la pression exercée par la protection des cultures dans un territoire et contribuer à modéliser leur impact sur la qualité de l'eau.

Mots-clés

Pollution agricole, pratique phytosanitaire, blé, maïs, indicateur, bassin versant, Orgeval.

Abstract

We analyzed almost 3000 summary sheets coming from farmers "land management logbooks" in the Orgeval watershed, Ile-de-France region, France, during 1990-2009. We could estimate the evolution of the total phytosanitary pressure in this watershed and recapitulate the evolution of pesticides use applied to two main crops (wheat and maize). We defined and calculated various indicators based on agricultural practices which highlighted two main results: the decreasing volumes of active ingredients used over the period, in parallel with an increased diversity of molecules applied by farmers. This latter finding illustrates the constant high dependence of cropping systems on phytosanitary applications (particularly herbicides). In spite of the meaningfulness of these logbooks, questions are raised about their accessibility and, consequently, about their representativeness. This limitation should be taken into account when estimating the evolution of chemical crop protection pressures at the watershed scale, and when using these data to simulate and predict their consequences on water quality.

Key-words

Agricultural pollution, crop protection, phytosanitary applications, wheat, maize, indicator, Orgeval watershed.

Introduction

En France métropolitaine, la présence de pesticides dans les eaux était avérée en 2011 dans 93 % des points de contrôle des cours d'eau et dans 63 % des points de contrôle des eaux souterraines (MEDDE, 2013). Alors que la directive cadre sur l'eau (DCE) du 23 octobre 2000 (directive 2000/60) fixe l'objectif général d'atteindre d'ici à 2015 le bon état des différentes masses d'eau sur le territoire européen, cette contamination des ressources en eau impose de maîtriser l'usage des pesticides. Dans cet objectif, le plan ECOPHYTO, piloté par le Ministère en charge de l'Agriculture à la suite du Grenelle de l'Environnement, a été mis en place en 2008. Il vise notamment à réduire progressivement l'utilisation des produits phytosanitaires par les agriculteurs.

Dans ce contexte, suivre et évaluer l'évolution de l'usage des pesticides agricoles est un enjeu important pour de nombreux acteurs-gestionnaires (Agences de l'eau, collectivités territoriales, services de l'Etat, etc.) pour évaluer les pressions polluantes, correspondant à l'intensité d'utilisation de ces produits, ou pour estimer ses impacts sur la qualité des ressources en eau. Son analyse doit tenir compte de deux principales contraintes. D'une part, pour caractériser les pressions, il est important de prendre en compte la diversité des pratiques phytosanitaires mises en œuvre par les agriculteurs dans leurs parcelles cultivées. Les indicateurs de pression phytosanitaire fondés sur les pratiques agricoles sont ainsi reconnus comme étant essentiels pour affiner notre connaissance de l'utilisation réelle des pesticides et suivre son évolution (Pingault et al., 2009). D'autre part, afin de mettre en relation les pressions phytosanitaires avec leurs impacts en termes de contamination des ressources en eau, il est nécessaire de les caractériser à des échelles d'espace et de temps pertinentes par rapport aux mécanismes de transfert des contaminants dans le milieu : ces échelles correspondent à des

territoires, souvent vastes, de bassins versants ou de bassins d'alimentation de captages et à des périodes de temps longues cohérentes avec les temps de réponse des systèmes hydrologiques à des contaminations de surface.

Un obstacle important au suivi et à l'évaluation de l'évolution de l'usage des pesticides agricoles est le déficit important de connaissances sur les pratiques phytosanitaires des agriculteurs (Aubertot *et al.*, 2005). En effet, peu de sources d'information permettent de les renseigner en respectant les contraintes précédemment mentionnées. Parmi elles, l'enquête « Pratiques Culturelles » réalisée par le Service de la Statistique et de la Prospective (SSP) du Ministère en charge de l'Agriculture sur un échantillon de quelques milliers de parcelles agricoles en France, décrit de manière très détaillée l'ensemble des opérations de l'itinéraire technique de conduite des cultures. Elle a été utilisée pour caractériser les stratégies de protection des cultures France entière (Champeaux, 2007 ; Brunet *et al.*, 2009). Toutefois, elle n'est réalisée que tous les 5 ans environ (1994, 2001, 2006 et 2011) sur un nombre limité de cultures, et sa représentativité n'est valable qu'à l'échelle régionale (Agreste, 2014). Créée en 2009, la Banque Nationale des Ventes des distributeurs (BNV-d) est alimentée par les déclarations des bilans annuels de ventes de produits phytosanitaires transmis par les distributeurs aux Agences et Offices de l'Eau. Elle permet de suivre à l'échelle nationale l'évolution des produits vendus chaque année (évaluée notamment via le calcul du NODU « Nombre de Doses Unités », indicateur de référence de suivi du plan Ecophyto), toutes cultures confondues. Mais elle ne permet pas de renseigner les pratiques des agriculteurs ni de travailler, à l'heure actuelle, à l'échelle de bassins et sur le temps long.

Les limites de ces sources d'information nous ont amenées à mobiliser des informations consignées directement par les agriculteurs via des « carnets de plaine », dans lesquels ils notent le détail des opérations de conduite des cultures qu'ils réalisent. Cette modalité d'enregistrement s'est développée dans les collectifs de vulgarisation au cours des années 1960 en s'inscrivant dans un processus de transformation-rationalisation des méthodes de travail en agriculture (Joly, 1997). Elle a permis l'émergence de la pratique de l'enregistrement qui a symbolisé le rôle avant-gardiste des Centres d'Etudes Techniques Agricoles (CETA) (Joly, Op.Cit.).

Cet article vise à montrer comment l'exploitation des carnets de plaine des agriculteurs produit des connaissances pertinentes pour évaluer l'évolution de l'usage des pesticides de façon fine, à des échelles permettant d'en déduire l'évolution des pressions agricoles au sein d'un bassin versant et de contribuer à l'évaluation de leur impact sur la qualité de l'eau. Il s'appuie sur un cas d'étude qui est celui du bassin versant de l'Orgeval en Seine-et-Marne, Observatoire de Recherche en Environnement depuis 50 ans (Tallec, 2012 ; Loumagne et Tallec G., 2012), qui est actuellement un territoire test pour le développement d'un modèle de transfert des pesticides dans le système sol-nappe-rivière (Blanchoud *et al.*, 2011 ; Queyrel, 2014).

Après avoir décrit le site d'étude et la nature des informations recueillies, nous abordons le choix des indicateurs retenus pour décrire les pressions liées à l'usage des pesticides à deux niveaux d'organisation : celui de la culture et celui du bassin versant. Les résultats sont ensuite présentés sous forme de dynamiques d'évolution des indicateurs de pression à ces deux niveaux d'organisation. Dans une dernière partie, nous discutons la qualité et la pertinence des carnets de plaine en tant que source d'information sur les pratiques agricoles, puis nous revenons sur les problèmes méthodologiques posés par l'évaluation de pressions ou d'impacts qui tiennent compte des pratiques agricoles.

Matériels et méthodes

Le site d'étude : le bassin versant de l'Orgeval

Le bassin de l'Orgeval s'étend sur 106 km² sur le Plateau de Brie en Seine-et-Marne. L'Orgeval est un affluent du Grand-Morin, situé en rive gauche de la Marne (Fig. 1). Le bassin hydrographique recoupe (totalement ou partiellement) dix-huit communes (Fig. 2). Selon la base de données géographique Corine Land Cover 2006 près de 80% de la surface totale du bassin est constituée de Surface Agricole Utile (SAU), très majoritairement composée de terres labourables (77% de la surface du bassin). Les surfaces forestières (environ 20%) restent importantes, avec de grands massifs situés notamment au centre et à l'ouest, alors que les surfaces urbanisées représentent moins de 1% de la surface du bassin. Compte tenu de la faible emprise des infrastructures urbaines sur le bassin, la contamination des ressources en eau par les produits phytosanitaires s'avère essentiellement d'origine agricole.

En mobilisant, d'une part le Recensement Agricole (RA, qui recense environ tous les dix ans l'ensemble des exploitations agricoles françaises et fournit à l'échelle communale, en fonction de la localisation du siège d'exploitation, un grand nombre d'indicateurs sur la structure des exploitations, dont l'assolement) et, d'autre part, le Registre Parcellaire Graphique (RPG, qui fournit des informations plus précises sur le parcellaire et l'assolement à l'échelle des îlots⁴³ mais qui est disponible uniquement sur une période plus récente de 2006 à 2010), nous avons identifié 53 exploitations représentatives⁴⁴ sur le bassin en 2007. D'après les RA, depuis 1988 (Fig. 3), les deux principales cultures sur le bassin sont restées le blé (sur plus de 40% de la SAU) et le maïs (environ 13% de la SAU). Le RPG de 2010, malgré des nomenclatures qui diffèrent, confirme les grandes tendances identifiées par le RA.

⁴³ Un îlot correspond à un ensemble contigu de parcelles culturales exploitées par un même agriculteur.

⁴⁴ Le critère de représentativité choisi a été de ne retenir que les exploitations situées au-dessus de la moyenne pour les deux indicateurs de « poids » et de « concernement » (Durpoix et Barataud, 2014).



Figure 1 - Localisation du bassin de l'Orgeval dans le bassin versant de la Seine

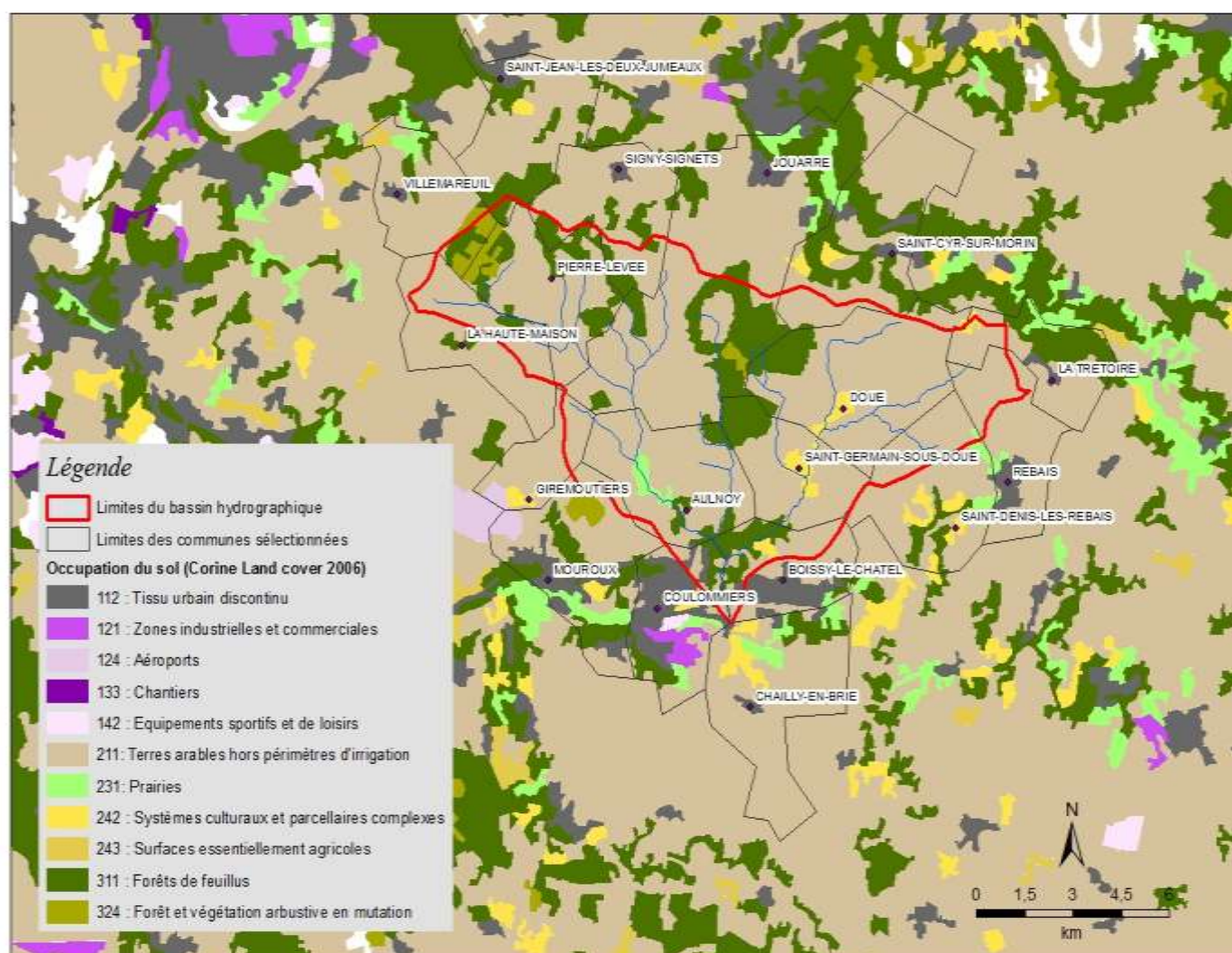


Figure 2 - Occupation du sol sur le bassin de l'Orgeval en 2006 et limites des communes du bassin
(Sources : Corine Land Cover)

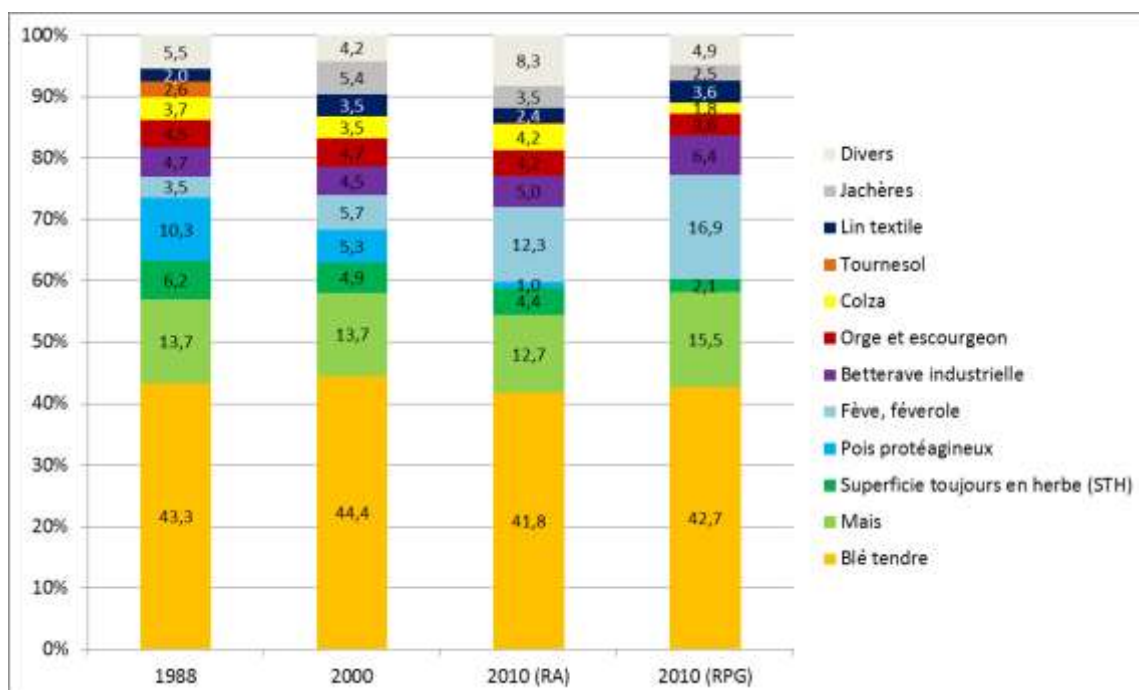


Figure 3 - Assolement des 18 communes du bassin de l'Orgeval entre 1988 et 2010 (Sources : RA) et comparaison avec l'assolement des îlots du bassin de l'Orgeval en 2010 (Sources : RPG)

Les carnets de plaine des agriculteurs : une source d'information riche mais hétérogène

Pour renseigner les pratiques phytosanitaires des agriculteurs dans leurs parcelles cultivées sur le temps long, nous nous sommes tournées vers la seule source d'information disponible à ces échelles de temps et d'espace (Nicola et al., 2012). Il s'agit des « carnets de plaine », « carnets de champs » ou « carnets de culture » qui, sous des formes très variées, gardent la mémoire de toutes les interventions culturales effectuées sur une parcelle pour une campagne donnée.

Ces carnets présentent une très forte variabilité tant dans leur forme (cahiers avec notes manuscrites ou enregistrements informatisés) que dans la longueur de la période couverte, et le type d'informations archivées (Tab. 1), ou encore de leur structuration. Nous distinguons les fiches parcellaires et les formes « agenda ». Les fiches parcellaires rassemblent systématiquement l'ensemble des interventions effectuées sur une parcelle ou un groupe de parcelles, en les regroupant par grand type (ex. : travail du sol, fertilisation, désherbage etc.). Il s'agit du matériau le plus homogène, bien qu'il en existe différents types selon l'organisme de conseil qui l'a fourni à l'agriculteur. La forme « fiche parcellaire » est souvent une exigence dans le cadre des contrats commerciaux ou des démarches qualité car elle permet le suivi de lots⁴⁵ (Acta, 2007). Certaines d'entre elles, à vocation plus technico-économique, permettent de calculer le coût/hectare de chaque poste de l'itinéraire technique et donc la marge brute par parcelle. La fiche parcellaire indique une préoccupation de suivi technique de la culture propre aux organismes de développement agricole. Mais les carnets peuvent également prendre une forme « agenda » qui correspond à une entrée par date de réalisation des travaux qui reflète alors plutôt la volonté de l'agriculteur d'enregistrer l'avancement de son travail (Mazé et al., 2004).

⁴⁵ Un lot de culture est un ensemble de parcelles où une même espèce est cultivée de la même manière tout au long du cycle cultural (in Mazé et al., 2004)

Caractéristiques de la parcelle	Nom, surface, type de sol, situation particulière (zone vulnérable, périmètre de captage, etc.), îlot PAC, etc.
Culture	Espèce, variété, débouché visé, etc.
Précédent	Cultures précédentes, culture intermédiaire avant l'implantation, gestion des résidus de la culture précédente, etc.
Implantation	Travail du sol, date de semis, densité de semis, écartement entre rangs, buttages, etc.
Fertilisation	Apports d'amendements organiques et fertilisants minéraux, nature des produits apportés, dates d'apports, quantités, outils de pilotage (reliquat sortie Hiver, objectif de rendement, sources du conseil), etc.
Protection phytosanitaire	Produits phytosanitaires employés, date de traitement, dose, cibles, indicateurs de décision, météo (T° et hygrométrie) le jour du traitement ainsi que les jours suivants (mm de pluie), réglage du pulvérisateur, etc.
Irrigation	Dates d'irrigation, quantité apportée/apport, etc.
Récolte	Date de récolte, rendement, humidité des graines, autres caractéristiques qualitatives, etc.
Interculture suivant la récolte	Devenir des résidus, culture intermédiaire, etc.
Une colonne « Observations » permet généralement à l'agriculteur de rajouter tous les renseignements qui lui semblent utiles.	

Tableau 1 - Exemple d'informations contenues dans un carnet de plaine

Au total, 19 agriculteurs, dont les exploitations sont situées en partie sur le bassin de l'Orgeval, ont accepté de nous confier leurs carnets, soit 36% des 53 exploitations estimées dans le bassin et 22% de la surface des îlots inclus dans le bassin. Ce matériau constitue un corpus de 2829 enquêtes parcellaires couvrant la période de 1990 à 2009, dont la durée est cohérente avec le temps estimé pour le transfert des contaminants vers les nappes (Tab. 2).

Code Exploitation	Nombre d'enquêtes par exploitation																				Total/ Exploitation
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
A1	14	15	16	16	13	14	14	13	15	12	13	1	1	1	1	1	1	1	2	1	169
A2	34	34	35	34	34	30	33	34	31	32	31	29	30	36	36	36	34	29	27		619
A3	10	11	8	8	11	7	10	9	11	7	11	7	12	7	11	8	10	7	11		176
A4	3	2	4	4	4	4	2	5	5	5	6	7	3				1	1	1	1	58
A5	15	20	15	15	13	14	15	15	14	15	14	1	18	18	15	17	19		17		270
A6	1	1	1			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	18
A7	16	17	14	8	17	14	15	15	13		13	7	12	8	11		9				189
A8		13	14	14	13	13	15	13	15	12	14	16	13	12	14	13	13	13	11	9	250
A9				23	18	17							19	19	19	18	19	19	18	18	207
A10								18	17	18	16	16	15	17	16	17	15	18	18		201
A11									2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	23
A12									16	16	16	16	13	13	14	13	13	14	14		158
A13												9	11	10	14	10	10	5	12		81
A14														23		25					48
A15															17	15	15	17	15	18	97
A16															6	9	9	6	17	8	55
A17																	21	24	7	25	99
A18																		18	25	27	70
A19																			19	22	41
Total/année	93	113	107	122	123	114	105	123	140	120	137	111	150	167	177	185	192	175	217	132	2829
	Notes sur cahier					Fiches parcellaires papier					Fiches informatiques					Retranscription					

Tableau 2 - Analyse du nombre de fiches parcellaires recueillies par année et par exploitation sur le bassin de l'Orgeval entre 1990 et 2009

Pour 18 des 19 exploitations, les carnets se sont présentés, au moins une année, sous forme de fiches parcellaires annuelles (structuration des données par parcelle puis par ordre chronologique ou par type d'intervention). Mais des cahiers ou des agendas porteurs d'une autre logique (structuration par culture ou par journée de travail) nous ont aussi été confiés (Tab. 3).

Type de support	Structuration des données		
	par parcelle		Autre (par culture, par date etc.)
	ordre chronologique	type d'intervention	
Document manuscrit (cahier / carnet / feuille volante)	A1; A18; A16	A7; A3	A2; A6; A4; A8; A17
Document imprimé (carnet relié ou feuille volante)		A14; A15; A5; A9; A7; A10; A13; A18; A4; A8; A12; A16; A17	
Document informatique	A1 ; A4 ; A16	A19; A2; A11	

Tableau 3 - Structuration des données et type de support rencontrés par exploitation enquêtée entre 1990 et 2009 (les types de supports peuvent se succéder dans le temps pour une même exploitation)

Globalement, nous notons une nette progression des données recueillies à partir du début des années 2000, notamment en termes de nombre d'exploitations représentées (Fig. 4). La quantité de données fournies est cependant variable selon les exploitations (Tab. 2) : certaines ont conservé leurs carnets sur toute ou presque la période d'étude (cas des exploitations A1 à A8), voire au-delà, d'autres seulement sur un nombre très restreint d'années. Certaines nous ont transmis un grand nombre de fiches parcellaires par an (jusqu'à 38), d'autres une seule fiche par an⁴⁶.

Les cultures de blé et de maïs dont les pratiques de désherbage sont responsables des molécules retrouvées majoritairement dans les analyses d'eau de captage, sont aussi celles qui correspondent au plus grand nombre de fiches parcellaires : elles serviront donc d'exemples pour la plupart des illustrations présentées par la suite. Sur les 20 ans étudiés, nous disposons de 50 à 116 parcelles enquêtées par année pour le blé tendre d'hiver, pour 6 à 19 exploitations (Fig. 5), et de 2 à 26 parcelles enquêtées par année pour le maïs, pour 1 à 9 exploitations.

⁴⁶ Il s'agissait par exemple d'un seul itinéraire technique pour l'ensemble des parcelles de maïs.

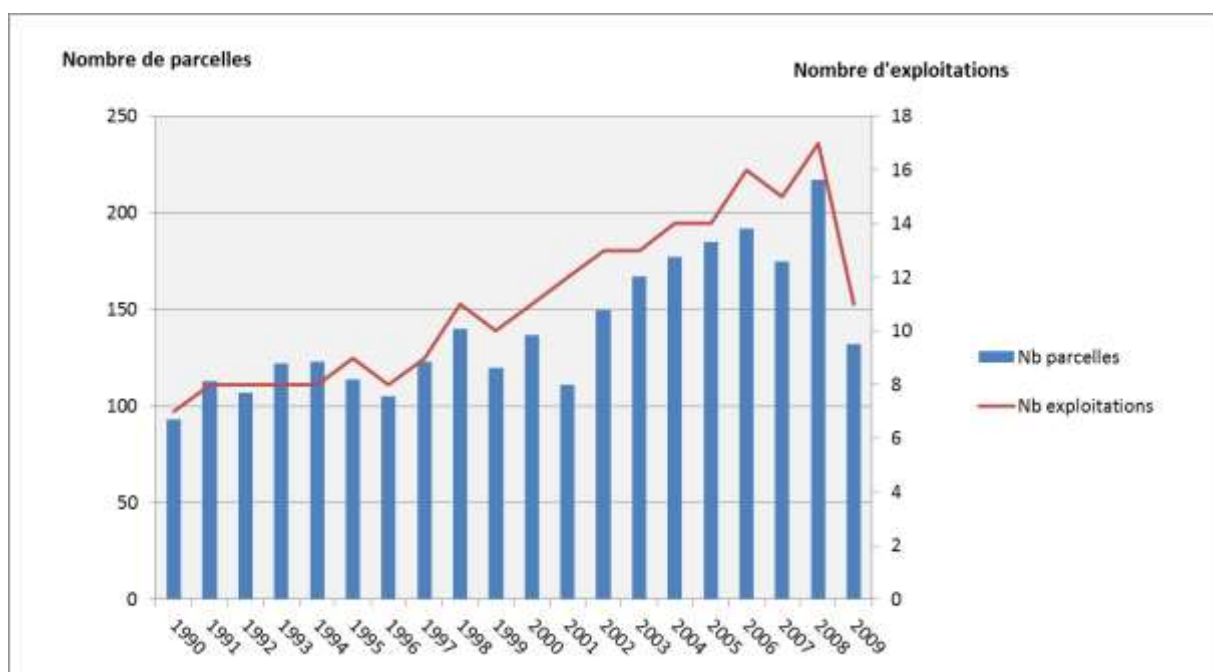


Figure 1 - Évolution du nombre de parcelles et du nombre d'exploitations enquêtées pour l'ensemble des cultures entre 1990 et 2009
Les indicateurs de pression phytosanitaire retenus

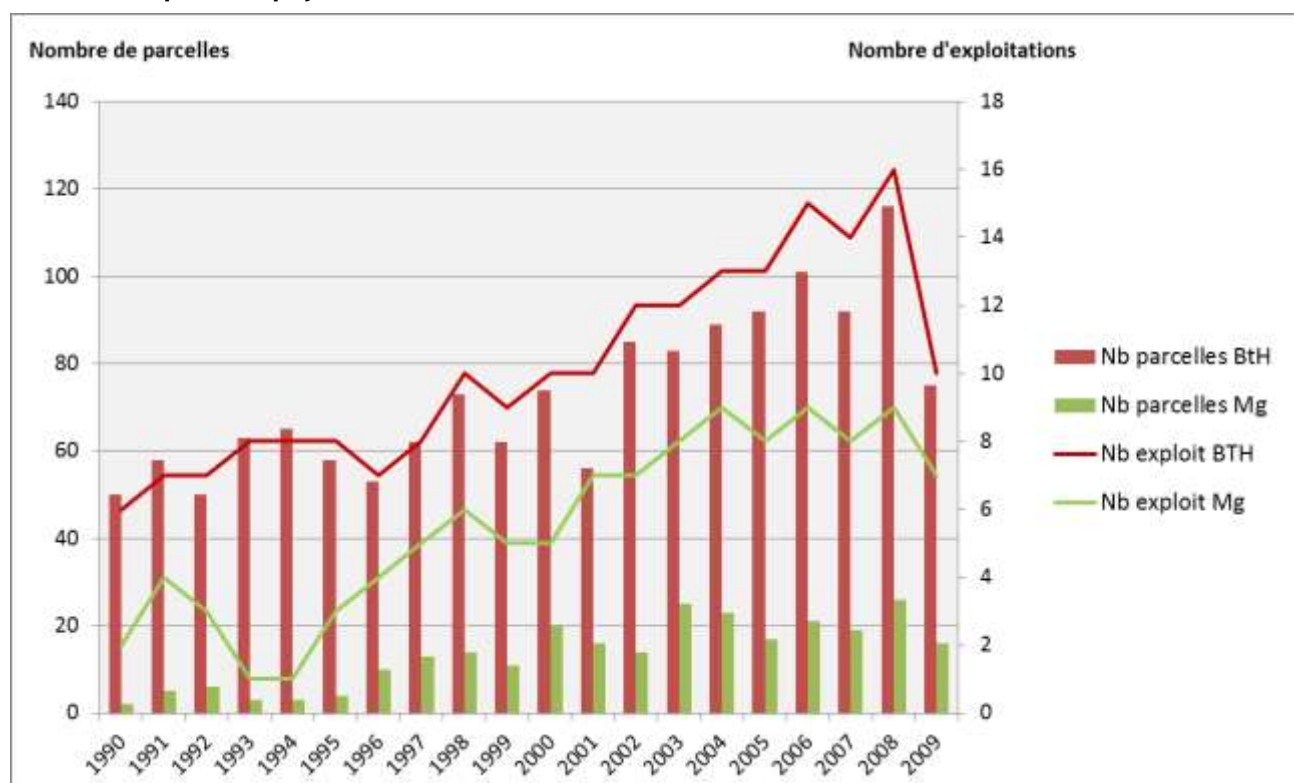


Figure 5 - Évolution annuelle du nombre de parcelles et d'exploitations enquêtées pour le blé tendre d'hiver (BtH) et le maïs grain (Mg) entre 1990 et 2009 sur le bassin de l'Orgeval

Pour répondre à nos deux objectifs (suivi des pratiques agricoles et mise en relation avec les mécanismes de transfert des contaminants), nous avons caractérisé les pressions à deux niveaux d'organisation : celui du bassin versant et celui de la culture conduite par l'agriculteur.

Pour estimer les pressions phytosanitaires totales exercées à l'échelle du bassin de l'Orgeval, nous avons quantifié le nombre total de molécules utilisées par type de traitement ou par famille chimique. L'indicateur retenu est la « Quantité totale de Matières Actives » (QMA) qui est l'indicateur de pression le plus couramment utilisé pour évaluer les pressions de manière globale ou de manière agrégée par grande famille de produits (herbicides, fongicides, insecticides, etc.). Le calcul des QMA a été pondéré par les surfaces de chacune des cultures dans le bassin entre 1990 et 2009. Nous avons estimé annuellement ces surfaces à partir d'une enquête centrée sur les assolements conduite auprès d'un échantillon complémentaire d'exploitations (qui a permis de renseigner l'évolution de l'assolement du bassin sur 50% de la SAU), des caractéristiques des successions culturales ren-

seignées dans les carnets de plaine et des déclarations « PAC » fournies par les agriculteurs enquêtés. Nous avons ainsi produit un inventaire des Matières Actives (MA) utilisées par les agriculteurs du bassin de l'Orgeval sur les 20 dernières années (i) en évaluant les quantités totales de MA appliquées sur le bassin par catégorie de traitement, globalement sur la période étudiée ou année après année et (ii) en recherchant les MA ou les familles de MA les plus utilisées sur le bassin.

Au niveau de la culture, nous avons comparé différents indicateurs classiquement utilisés. Ces indicateurs pertinents à ce niveau, voire au type de traitement ou au produit utilisé (nombre de passages, dose moyenne appliquée, etc.), présentent chacun des avantages et des inconvénients spécifiques et ne permettent pas de renseigner les mêmes questions (Tab. 4, d'après Pingault *et al.*, 2009). L'indicateur QMA (en kg/ha) a été repris et appliqué aux deux cultures majeures. Le cas du maïs est intéressant de ce point de vue en raison des nombreuses MA dont l'homologation a été retirée au cours du temps (Fig. 11). Mais, l'indicateur QMA comportant un certain nombre de biais (Tab. 4), nous avons également mobilisé des indicateurs complémentaires : en premier lieu, le nombre de produits utilisés lors de la campagne et le nombre de passages⁴⁷ ; ensuite l'IFT qui, contrairement aux indicateurs précédents, prend en compte la dose appliquée (Brunet *et al.*, 2008) en calculant l'IFT_{culture} total (IFT_{blé} et IFT_{maïs}) ainsi que les IFT_{culture} détaillés selon le type de traitement (herbicide, fongicide, etc.). Nous avons ainsi pu les comparer avec le nombre de passages et de produits utilisés pour les mêmes types de traitements. Enfin, dans le cas des pratiques phytosanitaires jugées les plus « à risques », comme le désherbage du blé et du maïs (Queyrel, 2014), nous nous sommes intéressées de manière plus détaillée aux modalités d'utilisation des molécules correspondantes au cours de l'itinéraire technique, en utilisant trois descripteurs : (i) le pourcentage de parcelles traitées, (ii) la dose moyenne appliquée et (iii) la date moyenne de passage. Ces descripteurs jouent un rôle important dans les processus de transferts des pesticides dans l'environnement et sont notamment mobilisés dans certains modèles de simulation de ces transferts (Queyrel, *op. cit.*).

⁴⁷ Nous avons choisi de séparer ces deux indicateurs souvent regroupés en un seul (nombre de traitements) car il arrive souvent que plusieurs produits soient appliqués en un seul passage ou, à l'inverse, qu'un seul produit soit appliqué plusieurs fois au cours de l'année (à titre d'exemple, un même fongicide sur pomme de terre peut être appliqué jusqu'à 10 fois pendant la saison culturale).

Indicateur	Quantité de matière active (QMA)		Nombre de passages	Nombre de produits	Nombre de traitements	Indice de Fréquence de Traitement (IFT)			
Définition	Comptabilise annuellement les quantités utilisées ou vendues de substances actives sur un territoire donné		Nombre de passages (ou d'applications) au cours desquels des produits sont appliqués durant la campagne agricole	Nombre de produits commerciaux appliqués sur une culture donnée au cours d'une campagne agricole	Nombre de traitements appliqués sur une parcelle (ou un ensemble de parcelles) au cours d'une campagne culturale : un traitement se définit comme l'application d'un produit commercial en un passage	Nombre de doses homologuées appliquées sur une parcelle pendant une campagne culturale ([1] La dose homologuée est définie comme la dose efficace d'application d'un produit sur une culture et pour un organisme cible (un bioagresseur) donné)			
Avantages	Facilement compréhensible, largement utilisé à travers le monde (comparaison possible entre pays)	Peut se décliner par culture / par grande famille de produits etc.	Permet d'avoir une idée de la fréquence des traitements dans le temps, notamment du fractionnement de certains produits	Permet de quantifier la diversité de produits (et donc indirectement de MA) appliqués à la culture (si un même produit est appliqué 10 fois, nb prod = 1)	Combine les 2 indicateurs précédents	Permet de donner le même poids à des substances actives très différentes (i.e. possédant des doses efficaces d'application très différentes)	Prend en compte les quantités réellement appliquées au cours d'une campagne et tient compte des traitements à dose réduite	Reflète ainsi l'intensité d'utilisation des produits phytosanitaires en agriculture, autrement dit la « pression phytosanitaire » exercée sur l'environnement à l'échelle de la parcelle. Il mesure aussi indirectement la dépendance des agriculteurs vis-à-vis de ces produits	
Inconvénients	Ne tient pas compte des propriétés, ni de la toxicité, de chaque substance active	Agrège entre elles toutes sortes de MA s'utilisant à des doses très différentes => biais important : cet indicateur montre fréquemment une baisse très visible des quantités de MA achetées ou appliquées par hectare car remplacement des MA les plus anciennes qui s'utilisaient souvent à des doses/hectare très élevées (exprimées en kg/ha) par de nouvelles molécules beaucoup plus efficaces à faibles doses (g/ha)	Ne prend pas en compte le nombre de produits appliqués par passage, ni la dose de ces produits	Ne prend pas en compte la dose appliquée, ni la composition du produit (par ex. s'il contient une ou plusieurs MA, ou si 2 produits ont un nom différent mais la même composition)	Ne tient pas compte de la possibilité de traiter à dose réduite, ni des nouvelles pratiques de mélange associées à ces traitements à dose réduite	Ne constitue donc pas un descripteur du risque potentiel pour l'environnement (i.e. pour le milieu et pour les organismes non ciblés par le produit phytosanitaire utilisé).	N'intègre pas non plus les propriétés de la spécialité commerciale utilisée	Nécessite de connaître la dose homologuée retenue pour chaque couple «produit x culture» retenue pour calculer l'IFT	Se base sur l'utilisation des produits commerciaux et non sur les matières actives => possibilité de réduire artificiellement l'IFT en utilisant des « packs » contenant plusieurs MA

Tableau 4: Description des principaux indicateurs de pression phytosanitaire couramment utilisés et fondés sur les pratiques des agriculteurs

Résultats

Évaluation de l'évolution de la pression phytosanitaire sur le bassin versant

Entre 1990 et 2009, 259 MA appartenant à 84 familles chimiques et issues de 692 spécialités commerciales ont été utilisées sur le bassin de l'Orgeval (Fig. 6). Sur les 33 tonnes en moyenne de pesticides appliqués sur le bassin versant par an (soit une moyenne de 4kgMA/ha/an toutes cultures confondues), les herbicides représentent 48% des apports quantitatifs et couvrent 59% de la diversité des MA utilisées. Les quantités appliquées (Fig. 6) diminuent fortement au cours de la période étudiée puisqu'elles passent de plus de 50 t/ha en 1990 à environ 30 t/ha en moyenne entre 1996 et 2009, essentiellement en raison de la réduction de l'usage des fongicides sur céréales au début des années 90, avec la mise en place de doses réduites et le raisonnement des traitements systématiques⁴⁸.

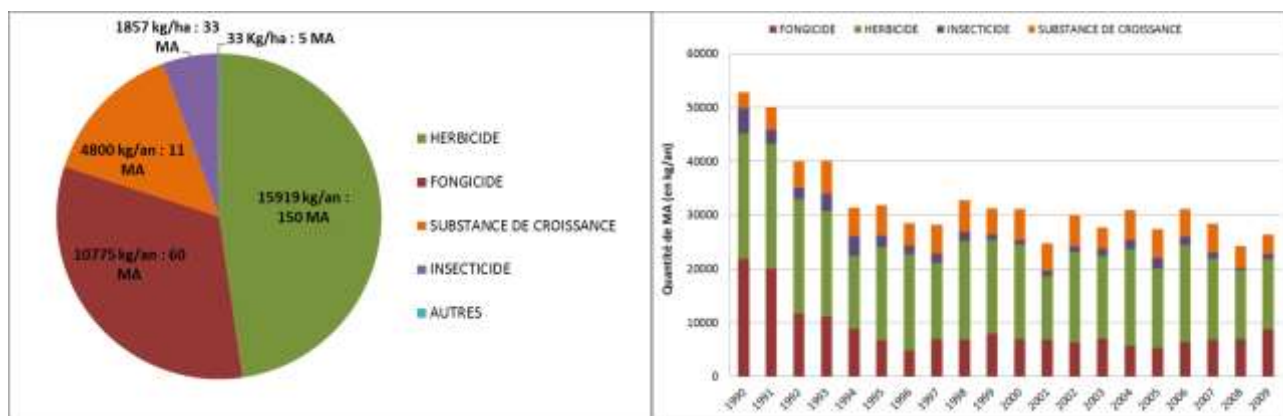
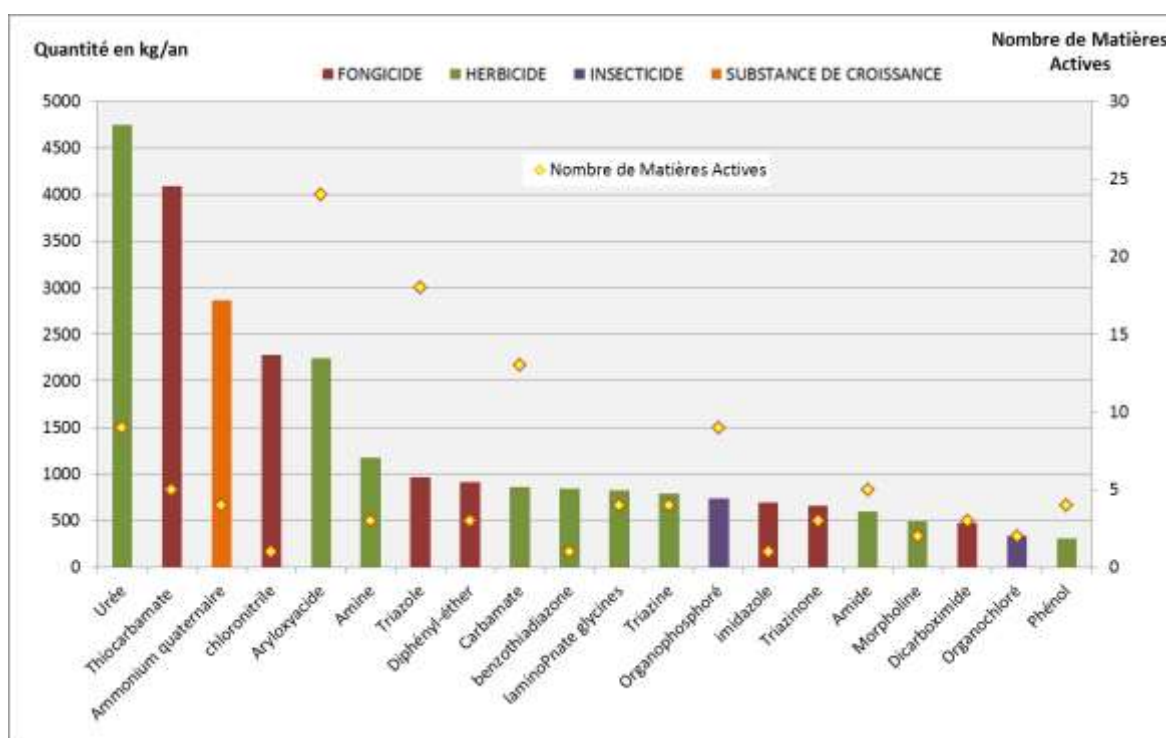


Figure 6 - Diversité de matières actives (MA) et quantité moyenne de pesticides appliquée en kg/an sur le bassin versant de l'Orgeval entre 1990 et 2009

Parmi les 84 familles chimiques recensées (Fig. 7), nous retrouvons majoritairement des familles herbicides telles que les urées, les aryloxyacides, les amines (les triazines arrivent encore en 12^{ème} position alors qu'elles sont interdites depuis 2003), mais aussi des familles fongicides telles que les thiocarbamates, les chloronitriles et les triazoles. Une famille de régulateur de croissance (ammonium quaternaire) ainsi que deux familles insecticides (les organophosphorés et les organochlorés), dont la plupart des MA sont aujourd'hui retirées de la vente, font également partie des principales familles recensées. Le nombre de MA dans chaque famille chimique est très variable d'une famille à l'autre et ne reflète pas forcément le poids quantitatif de la famille. La famille des urées, qui est la plus importante en tonnage, comporte seulement 9 MA différentes alors que celle des aryloxyacides, qui se place en cinquième position, en comporte 25.



⁴⁸ Voir partie Discussion.

Figure 7 - Familles de matières actives les plus utilisées en termes de quantité sur la totalité de la période d'étude (kg/an) et pour toutes les cultures confondues

Enfin, parmi les 20 MA les plus utilisées (en kg MA) sur le bassin versant au cours des vingt dernières années (Fig.8), figurent une majorité d'herbicides (13 molécules), notamment les urées (isoproturon, chlortoluron, methabenzthiazuron, néburon) mais aussi la bentazone, l'aclonifen ou le glyphosate. Cependant, ce sont un régulateur de croissance (chlormequat : 2,5 t/an) ainsi que des fongicides utilisés sur blé (chlorothalonil, mancozèbe et manèbe : entre 1,5 et 2,3 t/an) qui arrivent en tête de classement. Si les matières actives utilisées sur blé apparaissent en priorité (ce qui est logique, vue la place de la culture dans l'assolement du bassin versant), des quantités non négligeables de métamitronne liée à la culture de la betterave ou d'atrazine liée à celle du maïs sont toutefois également mises en évidence.

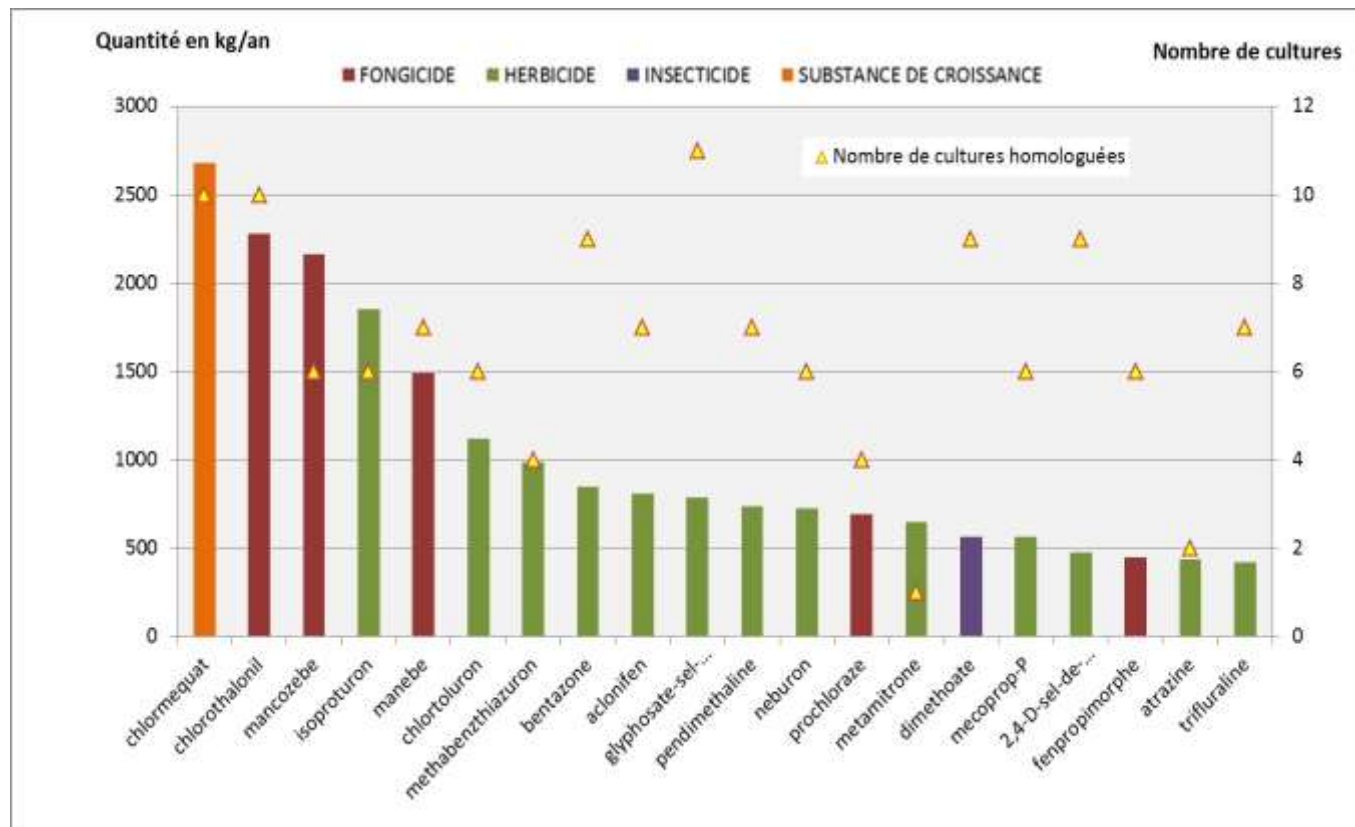


Figure 8 - Matières actives les plus utilisées en termes de quantité sur la totalité de la période d'étude (kg/an) et pour toutes les cultures confondues

Évaluation comparée de l'évolution de la pression phytosanitaire liée à deux cultures : le blé et le maïs

- Pression phytosanitaire estimée par la QMA

Les quantités de MA appliquées sur blé apparaissent deux à trois fois supérieures à celles appliquées sur maïs (Fig.9). Pour les deux cultures, elles ont enregistré une baisse importante (de l'ordre de 50%) entre 1990 et 1995-1996 : de 2 à 1 kg/ha pour le maïs et de 7 à 3 kg/ha pour le blé. Dans le cas du blé, ce sont essentiellement les fongicides qui ont diminué (raisonnement des pratiques associé à une réduction de dose), alors que les deux autres catégories (herbicides et substances de croissance) sont restées quasiment stables (Fig. 10). Dans le cas du maïs, la quasi-totalité des quantités de MA apportées est composée d'herbicides, qui ont enregistré une forte baisse en tonnage depuis le début des années 2000. Deux pics d'utilisation d'insecticides (lindane) en 1993, 1994 et 1997 sont à noter, mais ils sont toutefois à prendre avec précaution en raison du faible nombre d'enquêtes sur cette période (Fig.10).

En termes d'évolution des MA (Fig. 11), nous observons sur maïs une disparition des MA les plus utilisées, comme l'atrazine, le lindane ou l'alachlore, en relation avec leurs interdictions successives au cours des vingt dernières années. Ces MA ont alors été remplacées par une grande diversité de molécules à faible grammage.



Figure 2 - Évolution des quantités de matières actives totales utilisées pour la culture du blé tendre d'hiver et de maïs grain dans le bassin versant de l'Orgeval de 1990 à 2009 (Source : carnets de plaine)

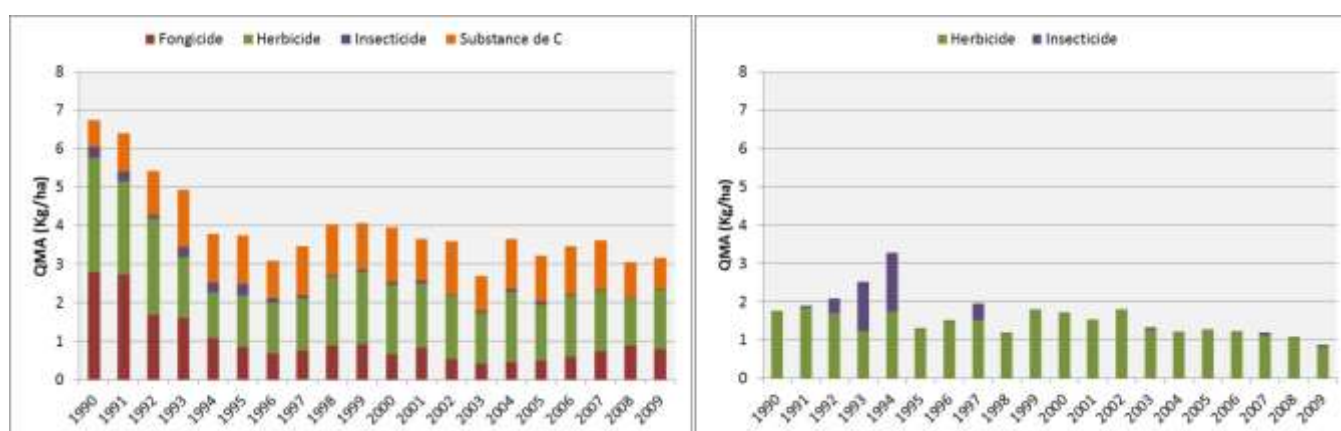


Figure 10 - Évolution des quantités moyennes de matières actives appliquées par catégorie de traitement sur blé tendre (à gauche) et maïs grain (à droite) entre 1990 et 2009

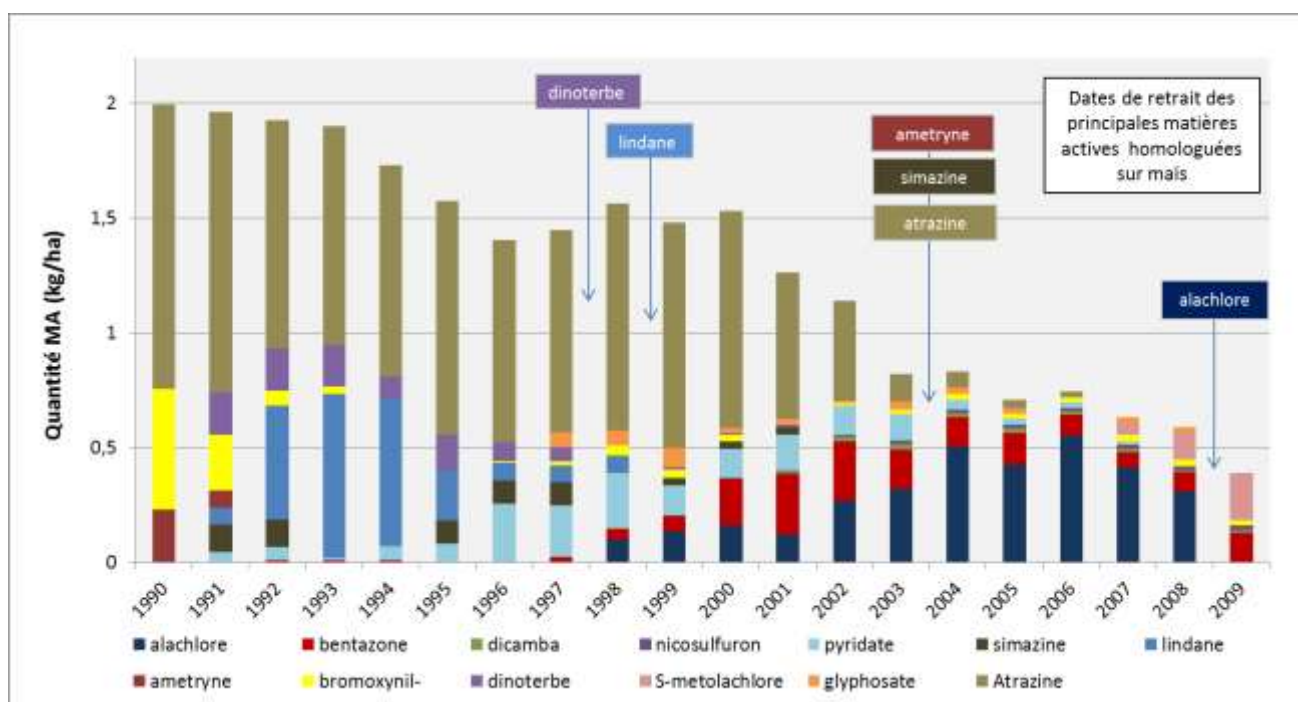


Figure 3 - Évolution des quantités des 14 matières actives les plus appliquées sur le maïs du bassin versant de l'Orgeval de 1990 à 2008

Pression phytosanitaire estimée par les autres indicateurs

Contrairement aux tendances mises en évidence par l'analyse des QMA, les autres indicateurs que nous avons choisis (nombre de passages, nombre de produits utilisés ou IFT total) ne montrent pas de baisse de la pression phytosanitaire (Fig. 12).

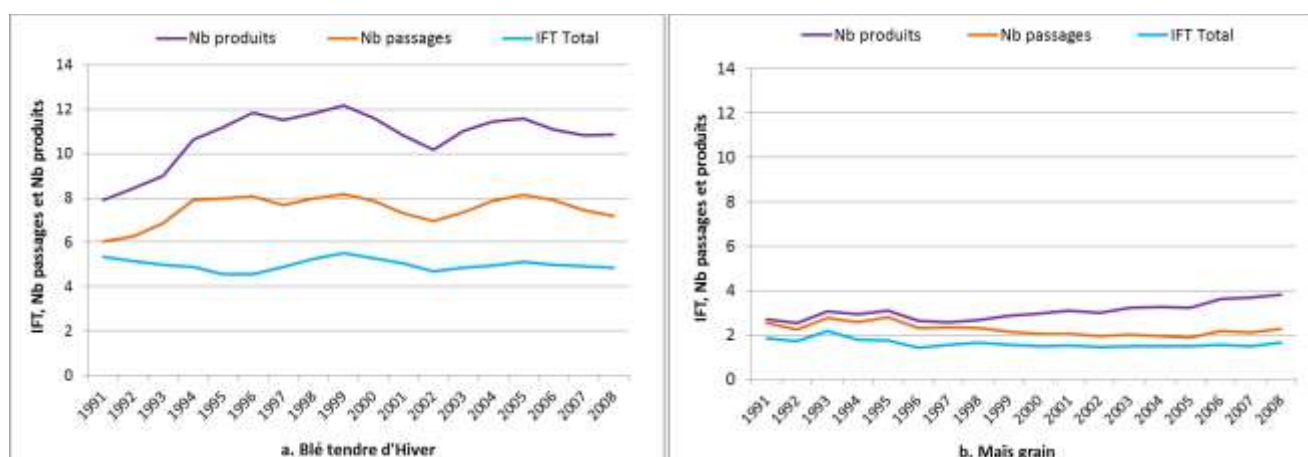


Figure 4 - Évolution de l'Indicateur Fréquence Traitement (IFT) total, du nombre de passages et de produits pour la culture du blé tendre d'hiver (BtH) et de maïs grain (Mg) dans le bassin versant de l'Orgeval de 1990 à 2009

Sur blé, les nombres de passages et de produits utilisés semblent avoir augmenté (de 10 à 12 produits et de 6 à 8 passages), alors que l'IFT_{blé} total est resté relativement stable (proche de 5), ce qui tend à démontrer une réduction de doses sur la période étudiée. L'IFT_{Insecticide} et l'IFT_{Régulateur de croissance} (catégorie « autres ») restent relativement stables au cours des 20 ans, tandis que l'IFT_{Fongicide} diminue de moitié entre 1990 et 2003 (de 2,5 à 1,25) pour augmenter à nouveau jusqu'en 2009 (jusqu'à 1,9) suite à l'apparition de résistances aux Strobilurines (Fig. 13) ; dans le même temps, l'IFT_{Herbicide} après avoir augmenté, reste stable depuis l'an 2000 (entre 1,6 et 2). Les indicateurs QMA et IFT montrent ainsi de façon convergente une diminution du recours aux fongicides au début des années 90 qui constituaient le principal poste des dépenses sur blé⁴⁹.

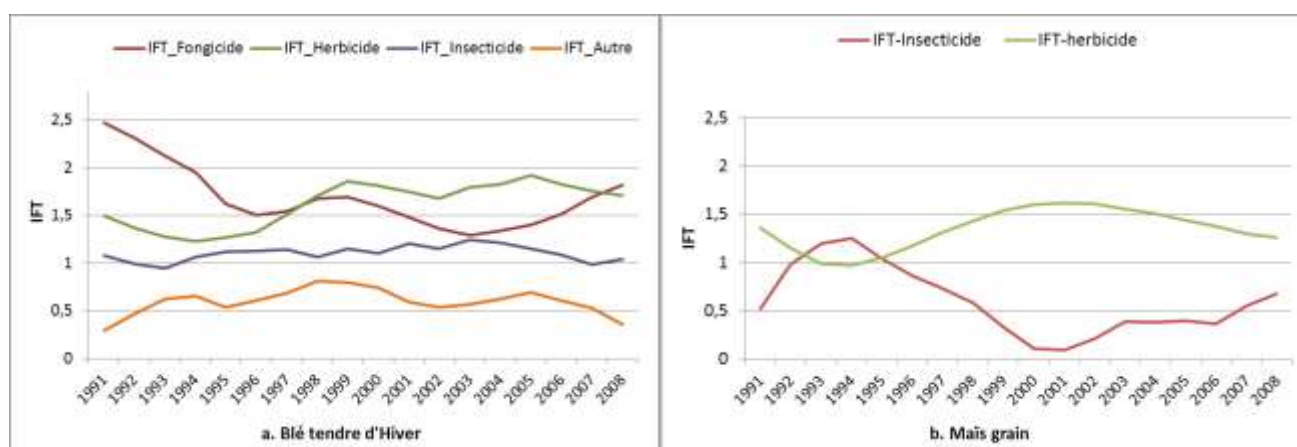


Figure 13: Évolution de l'Indicateur Fréquence Traitement (IFT) herbicide, fongicide, insecticide et régulateur de croissance pour deux cultures dans le bassin versant de l'Orgeval de 1990 à 2009

Sur maïs, l'IFT_{maïs} total tend à diminuer entre 1993 et 1996 (de 2,2 à 1,4), puis à se stabiliser tout comme le nombre de passages (de 2,8 à 1,8), après avoir augmenté de 1990 à 1993. En revanche, le nombre de produits utilisés a augmenté de manière presque continue (de 2,5 à 4) sur la période étudiée, ce qui s'explique notamment par la disparition de molécules « phare » comme l'atrazine, remplacée par un « cocktail » de molécules (Fig. 11). L'IFT_{herbicide} tend à diminuer depuis le début des années 2000 (de 1,6 à 1,2), après avoir fortement augmenté dans les années 90 (de 1 à 1,6). Ceci peut s'expliquer par la diminution des doses homologuées en atrazine qui passent de 1,5 à 1 kg en 1997 et qui augmentent donc artificiellement l'IFT. De son côté, l'IFT_{Insecticide} augmente à nouveau après avoir fortement diminué entre 1994 et 2001 (de 1,4 à 0). En effet, à partir des années 2006-2007, les insecticides sont souvent remplacés par des méthodes de lutte biologique (trichogrammes) qui rentrent dans le calcul de l'IFT, alors que les traitements de semences qui remplacent une partie des traitements insecticides ne sont pas pris en compte dans le calcul de l'IFT.

Caractérisation des pratiques d'application des molécules herbicides sur blé

⁴⁹ Voir partie Discussion

Les principales molécules herbicides anti-graminées utilisées sur blé, à savoir l'isoproturon et le chlortoluron ont, de par leur mode d'action racinaire, des propriétés physicochimiques qui leur confèrent une persistance importante dans les sols et une détection fréquente dans les analyses d'eau. Les pratiques d'application de ces molécules sont importantes à caractériser à travers certains descripteurs tels que le pourcentage de parcelles traitées, la dose moyenne appliquée et la date moyenne de passage, dans l'objectif de simuler leurs transferts dans l'environnement.

Nos résultats prouvent que l'isoproturon est devenu, au cours des années 90, la principale molécule de la famille des urées utilisée sur blé (notamment après le retrait d'homologation du néburon en 1998 et du méthabenzthiazuron en 2007) (Fig. 14). Il était utilisé de manière quasi-systématique (sur jusqu'à 90% des parcelles) à la fin des années 90 avant que les restrictions de doses en 2004, puis d'usage en 2008 pour des raisons environnementales, ne provoquent une diminution importante des pourcentages de parcelles traitées (autour de 40%). Le chlortoluron est la deuxième urée utilisée sur la zone d'étude mais de manière moins importante que l'isoproturon, en raison de problèmes de phytotoxicité qu'il engendre sur le blé. Mais avec l'apparition de variétés de blé plus tolérantes et de problèmes d'envahissement par le ray-grass, son utilisation a augmenté au cours de la période jusqu'à remplacer l'isoproturon. Ces deux produits sont ainsi arrivés à peu près à égalité au cours des dernières années dans leur fréquence d'utilisation sur les parcelles de l'Orgeval.

L'analyse de l'évolution des doses appliquées par hectare et par an (Fig. 14) montre que les doses d'isoproturon ont peu fluctué au cours du temps (entre 0,8 et 1 kg/ha/an) tandis que celles de chlortoluron ont davantage varié (de 0,5 à 1,2 kg/ha/an). Elles sont restées cependant très inférieures à la dose homologuée (DH) (de 20 à 40% de la DH pour le chlortoluron et de 40 à 50% de la DH pour l'isoproturon avant 2005). La pauvreté en argiles et colloïdes des sols du secteur permet en effet de ne pas utiliser de pleines doses. Dans ce cas, il est donc important de pouvoir distinguer doses homologuées et doses moyennes appliquées qui diffèrent de façon significative.

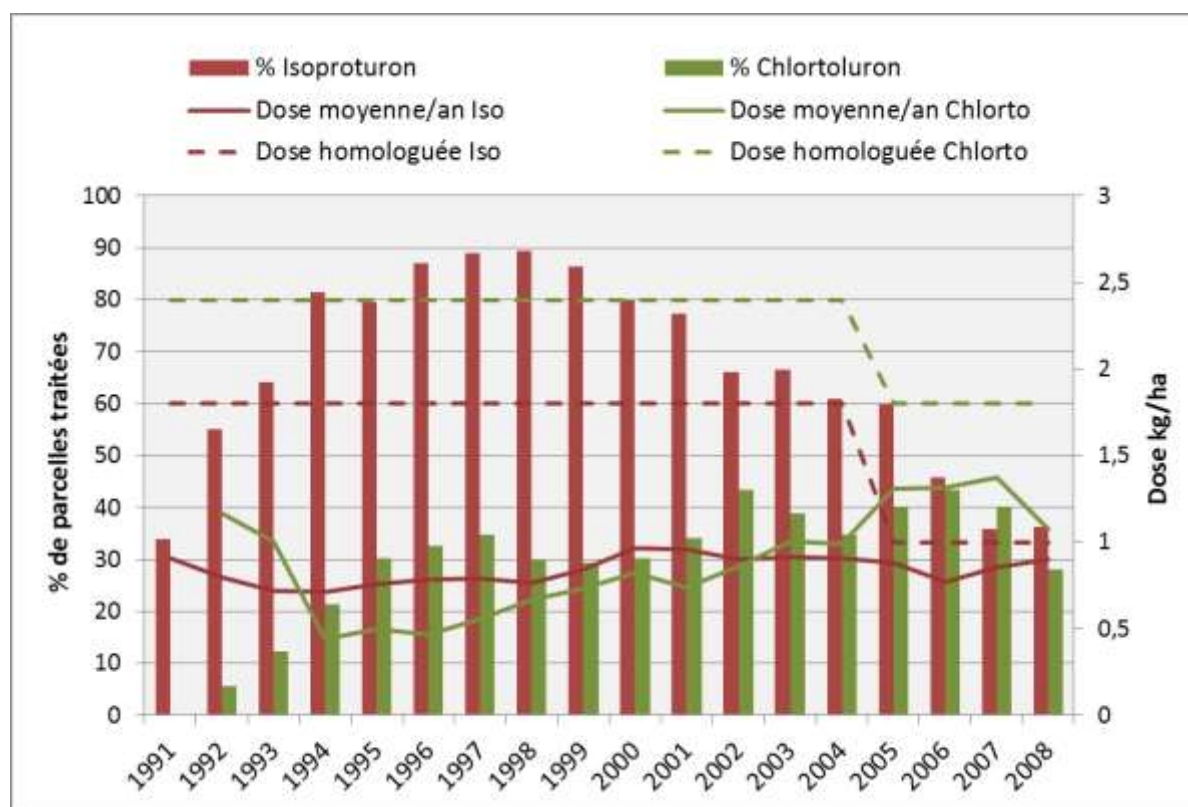


Figure 14 - Évolution des doses moyennes et homologuées (kg/ha/an) d'isoproturon et du chlortoluron et pourcentages de parcelles traitées pour le blé tendre d'hiver dans le bassin versant de l'Orgeval de 1990 à 2009

Enfin, l'analyse des dates d'application les plus fréquentes pour les différentes molécules herbicides du blé (sous la forme de nombre d'occurrences par décade exprimées en jours julien) permet de distinguer quatre grands types de molécules correspondant à quatre périodes d'application (Tab. 5) : la majorité sont des herbicides de printemps (53%), 10% sont des herbicides d'automne et 34% sont mixtes (ils peuvent être utilisés aussi bien à l'automne qu'au printemps, la date d'application étant fortement conditionnée par les conditions climatiques de l'année). Une dernière catégorie est constituée par une seule molécule, le glyphosate : il s'agit de déchaumages chimiques qui se répartissent entre mi-juillet et fin octobre (soit entre la récolte du précédent et le semis du blé). La constitution de périodes de référence pour les applications de matières actives sur la zone d'étude permet de reconstituer les calendriers de traitements pour chaque type de produit pour une culture donnée (Tab. 6). Cette information est essentielle pour estimer les risques de transfert de ces matières actives dans l'environnement par rapport aux conditions du milieu au moment de l'application (état de la végétation pouvant intercepter le produit, état hydrique du sol, pluviométrie, etc.).

	Juillet		Aout		Septembre		Octobre		Novembre		Décembre			Mars		Avril		Mai		Juin												
	181 à 190	191 à 200	201 à 210	211 à 220	221 à 230	231 à 240	241 à 250	251 à 260	261 à 270	271 à 280	281 à 290	291 à 300	301 à 310	311 à 320	321 à 330	331 à 340	341 à 350	351 à 360	361 à 370	...	61 à 70	71 à 80	81 à 90	91 à 100	101 à 110	111 à 120	121 à 130	131 à 140	141 à 150	151 à 160	161 à 170	171 à 180
Période de traitements			Déchaumage chimique (glyphosate) - selon précédent								Herbicide automne (10%)										Herbicide printemps (53% uniquement au printemps et 34 % à la fois en automne et au printemps)											
																						Fongicide										
											Insecticide automne																	Insecticide printemps				
																						Substance de croissance										

Tableau 1 - Reconstitution du calendrier de traitements du blé tendre sur une campagne agricole dans le bassin versant de l'Orgeval entre 1990 et 2009

Discussion et conclusion

Les carnets de plaine : une source d'information détaillée sur les pratiques agricoles mais qui présente des limites

Les carnets de plaine présentent des avantages indéniables : ils sont généralement la seule source d'information parcellaire disponible à l'échelle de petits territoires, qui permette de renseigner la grande majorité des descripteurs de l'itinéraire technique et, ce, souvent de manière continue sur plusieurs années et avec un recul historique parfois important. Dans le cas du bassin de l'Orgeval, il semble que la mise en œuvre de l'enregistrement des pratiques soit très répandue. La totalité des agriculteurs contactés disposaient d'enregistrements de leurs pratiques, informatisés ou non. Ceci peut s'expliquer en partie par l'importante activité de terrain de la Chambre d'Agriculture au cours des années 1990, qui a diffusé un grand nombre de ces carnets aux agriculteurs au travers des Groupes d'Étude et de Développement Agricole (GEDA).

De plus, comme il s'agit (du moins pour les années antérieures à 2005 et à la mise en place de la conditionnalité des aides de la Politique Agricole Commune) d'une démarche purement personnelle et volontaire des agriculteurs, les données qui y figurent ne sont pas biaisées par un souci de conformité avec la réglementation. C'est ainsi qu'y sont même parfois renseignées quelques pratiques en théorie non autorisées (application de produits non homologués sur certaines cultures, ou interdits depuis quelques années, etc.). Cette démarche conduit les agriculteurs à noter, souvent pour eux-mêmes, des informations qu'ils n'ont pas envie d'oublier, pour garder la traçabilité des opérations effectuées en opérant un tri dans les informations qu'il leur semble utile de conserver (Mazé *et al.*, 2004). Elle leur permet de se constituer des repères en vue d'organiser et de planifier une activité ultérieure, de manière à accroître la maîtrise de leur activité en se constituant progressivement des références personnelles. Elle leur sert notamment à identifier les constantes en vue de « routiniser » leurs pratiques, de valider des itinéraires « pratiques » résultant d'ajustements par rapport à des itinéraires techniques (Joly, 1997 et 2004, Casagrande, 2012).

Les carnets de plaine renseignent également sur la grande variabilité interannuelle mais aussi inter-exploitations des pratiques d'usage des pesticides, que nous n'avons pas développées ici. Cette variabilité peut être mise en relation avec différentes catégories de facteurs (conditions météorologiques, pression parasitaire, type de conseil, mode de conduite des cultures, etc.) de manière à analyser la diversité des logiques de conduite des cultures dans le secteur étudié et à contribuer à comprendre les déterminants de ces pratiques (Bürger *et al.*, 2012).

Mais cette source d'information présente aussi des limites dans l'optique d'une utilisation plus systématique par un gestionnaire par exemple. Tout d'abord, ce sont des données relativement difficiles à obtenir. Malgré la participation à plusieurs tours de plaine organisés par le CETA des deux-Morins (très influent dans la zone d'étude), lors desquels notre étude a été présentée aux agriculteurs, il a fallu un très grand nombre de relances téléphoniques pour réussir à joindre ceux-ci et éventuellement obtenir leur accord (sur les 90 agriculteurs pressentis, dont le siège d'exploitation était situé dans ou à proximité du bassin, seuls 36 ont pu être joints par téléphone, parmi lesquels 19 ont donné leur accord). À un problème de disponibilité lié à leur travail, s'ajoute en effet une méfiance croissante des agriculteurs vis-à-vis des contrôles, dans un contexte où ils se sentent particulièrement critiqués par la société et les médias (Nicola *et al.*, 2012).

En conséquence, la représentativité des données recueillies par rapport à la diversité des pratiques d'usage des pesticides au sein du territoire d'étude peut être questionnée. En effet, on ne peut pas exclure que seuls les agriculteurs dont les pratiques sont les plus conformes à la réglementation, aient accepté de nous confier leurs carnets.

Enfin, c'est une source d'informations partielles (certaines informations sont incomplètes, car oubliées ou négligées par les agriculteurs, notamment les désherbages totaux en période d'interculture – « déchaumage chimique » - qui sont partiellement

renseignés, ce qui implique un risque de sous-estimation systématique du poste « herbicides »), longues à saisir et à homogénéiser pour une exploitation statistique, qui demande une interprétation (comprendre la logique de chaque agriculteur) pour éviter les erreurs de saisie. Le développement de l'informatisation des enregistrements de pratiques chez les agriculteurs facilite certes la saisie mais elle limite le nombre et la diversité des informations recueillies. De surcroît, la fiabilité des pratiques consignées dans les carnets peut avoir diminué depuis 2006 où leur renseignement est devenu obligatoire et susceptible de contrôle. C'est le cas des informations exigées par le registre phytosanitaire et de celles exigées par le cahier d'enregistrement des pratiques d'épandage si l'exploitation est située en zone vulnérable.

Informar les évolutions de pratiques agricoles pour évaluer une pression phytosanitaire ou un impact : des points de vigilance méthodologiques

Évaluer la pression phytosanitaire à partir d'indicateurs portant sur les pratiques agricoles

En fonction de leur mode de calcul, ces indicateurs révèlent des évolutions différentes, voire divergentes, de l'utilisation des pesticides : l'indicateur QMA, souvent utilisé par certains groupes professionnels comme l'Union des Industries pour la Protection des Plantes, montre une nette tendance à la réduction des quantités de pesticides appliquées sur le bassin de l'Orgeval, tandis que l'IFT (utilisé en France pour évaluer l'efficacité des politiques publiques visant la réduction de l'usage des pesticides), le nombre de produits et le nombre de passages expriment au mieux une stagnation des usages voire, selon les périodes au sein des 20 années étudiées, une augmentation de l'usage de certaines familles chimiques (notamment les herbicides). Plusieurs auteurs pointent ainsi du doigt la nécessité de développer des analyses comparatives et des validations des différents indicateurs disponibles, par exemple sous la forme de « méta-méthodes » (Bockstaller *et al.*, 2009).

Les dynamiques d'usage des pesticides reconstituées sur l'Orgeval montrent un maintien de la dépendance des systèmes de culture vis-à-vis des traitements basés sur les produits phytosanitaires de synthèse, même si certaines stratégies alternatives sont recherchées. Parmi elles, les pratiques d'usage des fongicides sur blé ont été les premières ciblées dans un objectif initial de réduction des charges opérationnelles des exploitations : le raisonnement de ces pratiques a permis de supprimer les traitements systématiques, en prenant en compte la pression fongique réelle, et de généraliser l'usage de doses réduites. En revanche, les mêmes progrès n'ont pu être réalisés sur les herbicides en raison du manque de solutions chimiques efficaces sur le long terme, de l'apparition de résistances aux anti-graminées (famille des Fops) dans les années 1990 et du développement du non-labour qui a entraîné un salissement accru des parcelles. Au final, le changement le plus important mis en évidence ces 20 dernières années est le remplacement de molécules « phares » telles que l'atrazine, utilisées massivement à fortes doses pendant des années, par des molécules plus diversifiées, efficaces à doses beaucoup plus faibles, et présentant généralement un classement toxicologique moindre.

Comment intégrer des descripteurs de pratiques agricoles dans l'évaluation de l'impact sur la qualité de l'eau ?

Les indicateurs de pression fondés sur les pratiques agricoles mesurent l'intensité de l'utilisation des pesticides mais n'évaluent pas un risque environnemental ou un impact sur le milieu. Ils ne tiennent compte ni des caractéristiques spécifiques à chaque produit phytosanitaire (solubilité, volatilité, toxicité, etc.), ni de la vulnérabilité propre à chaque milieu (Pingault, 2007). En raison des mécanismes de transfert des molécules phytosanitaires dans les sols, puis dans les nappes, le lien entre les pressions liées à l'usage des pesticides (estimées par exemple par les quantités de MA appliquées) et l'impact sur la qualité de l'eau (mesuré par exemple par les teneurs en MA détectées dans les analyses d'eau) n'est pas simple à établir. On peut seulement considérer que ces applications rendent les pesticides disponibles dans les différents compartiments environnementaux (Mottes *et al.*, 2014).

La quantification des molécules les plus utilisées sur le bassin de l'Orgeval a montré que les herbicides sont prépondérants, et notamment ceux de la famille des urées ou les triazines appliquées sur blé ou sur maïs. Ces résultats sont cohérents avec les molécules les plus fréquemment identifiées à l'exutoire du bassin : atrazine, isoproturon, chlortoluron, simazine et dééthylatrazine (DEA) ainsi que leurs métabolites (Queyrel, 2014). Mais d'autres matières actives, appliquées sur des cultures secondaires en termes de surfaces cultivées (herbicides sur betterave, certains fongicides ou régulateurs de croissance), sont apparues comme étant importantes à prendre en considération pour caractériser la pression phytosanitaire dans le territoire, sans pour autant être détectées de manière importante dans les analyses d'eau. À l'inverse, le quinmérac, matière active utilisée notamment pour le désherbage de la betterave et du colza, qui n'apparaît qu'en 95^{ème} position en termes de tonnage appliqué sur le bassin versant (35 kg/an) est pourtant détecté dans certaines analyses d'eau.

La modélisation des transferts de pesticides permet de construire un lien entre usage des pesticides et impact environnemental, en tenant compte à la fois de la vulnérabilité du milieu et des propriétés physico-chimiques des molécules. Pour modéliser ces transferts, il est nécessaire de se placer sur une période de temps longue (cohérente avec les temps de transfert de l'eau dans les nappes), sur un territoire ayant une pertinence hydrologique, et de renseigner au pas de temps annuel les variables d'assolement et d'itinéraires techniques de conduite des cultures qui sont intégrées en entrée des modèles. À titre d'exemple, la date d'application des pesticides, dont nous avons vu qu'elle pouvait intervenir lors de périodes de drainage favorisant le lessivage, est importante à informer pour simuler correctement les processus de transfert.

Les carnets de plaine, avec leur périodicité annuelle et leurs informations détaillées sur les opérations culturales par parcelle, sont une source d'information précieuse pour répondre aux besoins de la modélisation. Toutefois, le changement d'échelle de la parcelle au territoire du bassin versant n'est, là encore, pas simple à effectuer. Compte tenu de la part de la SAU du bassin renseignée par les carnets de plaine disponibles (jusqu'à 22%) et de la part de la SAU dont l'assolement annuel était connu (jusqu'à 50%), nous avons été conduites à formuler des hypothèses pour extrapoler ces informations à l'ensemble du territoire, qui constituent autant de sources d'incertitude à prendre en compte dans l'interprétation des résultats des modèles.

Remerciements

Nous remercions Laurine Nicola qui a réalisé et traité les enquêtes conduites dans les exploitations agricoles du bassin de l'Orgeval, ainsi que l'ensemble des agriculteurs qui ont accepté de nous confier leurs enregistrements. Cette étude a bénéficié du financement du Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'Environnement de la Seine (PIREN-Seine).

Bibliographie

- Acta, 2007. « Mes documents sur l'exploitation agricole » - Analyse des données et outils de traçabilité dans l'exploitation. 362 p. + annexes. http://www.docagri.fr/IMG/pdf/Mes_documents_sur_l_exploitation_-_01-11-10
- Agreste, 2014. Enquête pratiques culturales grandes cultures et prairies 2011 : méthodologie. *Agreste Les Dossiers*, 21, p. 69-72. http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/dossier21_methodologie.pdf
- Aubertot, J.N., Barbier, J.M., Carpentier, A., Gril, J.J., Guichard, L., Lucas, P., Savary, S., Savini, I., Voltz, M. (éditeurs), 2005. *Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux*. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA et Cemagref (France), 64 p
- Blanchoud, H, Barriuso, E, Chevreuil, M, Guery, B, Moreau-Guigon, E, Schott, C, Théry, S, Tournebize, J., 2011. *Les pesticides dans le bassin versant de la Seine : Comprendre les origines et le transfert des pesticides pour en évaluer l'impact sur l'homme et l'environnement*. Fascicule Agence de l'eau Seine Normandie du programme PIREN Seine # 14, 67p
- Bockstaller, C., Guichard, L., Makowski, D., Aveline, A., Girardin, P., Plantureux, S., 2008. Agri-environmental indicators to assess cropping and farming systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 28, 1, 139-149
- Brunet, N., Guichard, L., Omon, B., Pingault, N., Pleyber, E., Seiler, A., 2008. L'indicateur de fréquence de traitements (IFT) : un indicateur pour une utilisation durable des pesticides. *Courrier de l'Environnement*, 56, 131-141
- Brunet, N., Debaeke, P., Delos, M., Guerin, O., Guichard, L., Guinde, L., Mischler, P., Munier-Jolain, N., Omon, B., Rolland, B., Viaux, P., Villard, A., 2009. *ECOPHYTO R&D, Vers des systèmes économes en produits phytosanitaires, Volet 1 Tome II, Analyse comparative des différents systèmes en grandes cultures*. Rapport de l'INRA, du Ministère de l'agriculture et de la Pêche et du Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire, 218p
- Bürger, J., de Mol, F., Gerowitt, B., 2012. Influence of cropping system factors on pesticide use intensity - A multivariate analysis of on-farm data in North East Germany. *European Journal of Agronomy*, 40, 54-63
- Casagrande M., Joly N., Jeuffroy M.-H., Bouchard C., David C., 2012. Evidence for weed quantity as the major information gathered by organic farmers for weed management. *Agronomy for Sustainable Development*, 32 (3) : 715-726
- Champeaux C., 2007. *Les stratégies de protection du blé tendre contre ses bio-agresseurs et la verse. Valorisation des données de l'enquête Pratiques culturales du SCEES en 2001*. Ministère de l'Agriculture et de la pêche, Institut national de la recherche agronomique, UMR 211 Agronomie Grignon, 91 p
- Durpoix, A., Barataud, F., 2014. Intérêts de l'analyse territorialisée des parcellaires des exploitations agricoles concernées par une aire d'alimentation de captage. *Sciences Eaux & Territoires*, hors-série n°16
- Joly, N., 1997. *Écritures du travail et savoirs paysans. Aperçu historique et lecture de pratiques. Les agendas des agriculteurs*. Thèse de doctorat, Université Paris X, Nanterre
- Joly, N. 2004. *Ecrire l'évènement : le travail agricole mis en mémoire*. *Sociologie du Travail*, 46, 511-527
- Loumagne C., Tallec G. (Coord.), 2012. *L'observation long terme en environnement: Exemple du bassin versant de l'Orgeval*. Editions Quae ; Paris ; 333 p
- Mazé, A., Cerf, M., Le Bail, M., Papy, F., 2004. Entre mémoire et preuve : le rôle des écrits dans les exploitations agricoles. *Natures Sciences Sociétés*, 12, 1, 18-29
- MEDDE [Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie], Commissariat général au Développement durable, 2013. *Les pesticides dans les eaux*. http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/sujet/pesticides-eaux.html?tx_ttnews%5Btt_news%5D=10945&tx_ttnews%5Bcatdomaine%5D=1108&cHash=e76a3d2213576e5fbab226ea387516e2
- Mottes, C., Lesueur-Jannoyer, M., Le Bail, M., Malézieux, E., 2014. Pesticide transfer models in crop and watershed systems: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34 (1): 229-250.

Nicola, L, Schott, C, Mignolet, C., 2012. *Dynamique de changement des pratiques agricoles dans le bassin versant de l'Orgeval et création de la base de données APOCA (Agricultural Practices of the Orgeval Catchment Area)*. Rapport d'activité PIREN-Seine 2011, 49 p

Pingault, N., 2007. Améliorer la qualité de l'eau : un indicateur pour favoriser une utilisation durable des produits phytosanitaires. Atelier OCDE, 19 - 21 mars 2007, Washington, 10 p

Pingault, N., Pleyber, E., Champeaux, C., Guichard, L., Omon, B., 2009. *Produits phytosanitaires et protection intégrée des cultures : l'indicateur de fréquence de traitement*. Notes et études socio-économiques, Ministère de l'agriculture et de la pêche, 32, 61-94

Queyrel, W., 2014. *Modélisation du devenir des pesticides dans les sols à partir d'un modèle agronomique : évaluation sur le long terme*. Thèse de doctorat Université Pierre et Marie Curie, 233 p

Talleg, G., 2012. 1962-2012 : Cinquante ans d'observations, un bien précieux pour la recherche et les services opérationnels. *Sciences Eaux et Territoires*, spécial n°3, 1-8.

Liste des figures

Figure 1 : Localisation du bassin de l'Orgeval dans le bassin versant de la Seine

Figure 2 : Occupation du sol sur le bassin de l'Orgeval en 2006 et limites des communes du bassin (Sources : Corine Land Cover)

Figure 3 : Assolement des 18 communes du bassin de l'Orgeval entre 1988 et 2010 (Sources : RA) et comparaison avec l'assolement des îlots du bassin de l'Orgeval en 2010 (Sources : RPG)

Figure 4 : Évolution du nombre de parcelles et du nombre d'exploitations enquêtées pour l'ensemble des cultures entre 1990 et 2009

Figure 5 : Evolution annuelle du nombre de parcelles et d'exploitations enquêtées pour le blé tendre d'hiver (BtH) et le maïs grain (Mg) entre 1990 et 2009 sur le bassin de l'Orgeval

Figure 6 : Diversité de matières actives (MA) et quantité moyenne de pesticides appliquée en kg/an sur le bassin versant de l'Orgeval entre 1990 et 2009

Figure 7 : Familles de matières actives les plus utilisées en termes de quantité sur la totalité de la période d'étude (kg/an) et pour toutes les cultures confondues

Figure 8 : Matières actives les plus utilisées en termes de quantité sur la totalité de la période d'étude (kg/an) et pour toutes les cultures confondues

Figure 9 : Évolution des quantités de matières actives totales utilisées pour la culture du blé tendre d'hiver et de maïs grain dans le bassin versant de l'Orgeval de 1990 à 2009 (Source : carnets de plaine)

Figure 10 : Évolution des quantités moyenne de matières actives appliquées par catégorie de traitement sur blé tendre (à gauche) et maïs grain (à droite) entre 1990 et 2009

Figure 11 : Évolution des quantités des 14 matières actives les plus appliquées sur le maïs du bassin versant de l'Orgeval de 1990 à 2008

Figure 12 : Évolution de l'Indicateur Fréquence Traitement (IFT) total, du nombre de passages et de produits pour la culture du blé tendre d'hiver (BtH) et de maïs grain (Mg) dans le bassin versant de l'Orgeval de 1990 à 2009

Figure 13 : Évolution de l'Indicateur Fréquence Traitement (IFT) herbicide, fongicide, insecticide et régulateur de croissance pour deux cultures dans le bassin versant de l'Orgeval de 1990 à 2009

Figure 14 : Évolution des doses moyennes et homologuées (kg/ha/an) d'isoproturon et du chlortoluron et pourcentages de parcelles traitées pour le blé tendre d'hiver dans le bassin versant de l'Orgeval de 1990 à 2009

Liste des tableaux

Tableau 1 : Exemple d'informations contenues dans un carnet de plaine

Tableau 2 : Analyse du nombre de fiches parcellaires recueillies par année et par exploitation sur le bassin de l'Orgeval entre 1990 et 2009

Tableau 3 : Structuration des données et type de support rencontrés par exploitation enquêtée entre 1990 et 2009 (les types de supports peuvent se succéder dans le temps pour une même exploitation)

Tableau 4 : Description des principaux indicateurs de pression phytosanitaire couramment utilisés et fondés sur les pratiques des agriculteurs

Tableau 5 : Nombre d'occurrence de la date d'application pour les différentes molécules herbicides du blé tendre en fonction des décades de l'année (exprimées en jour julien)

Tableau 6 : Reconstitution du calendrier de traitements du blé tendre sur une campagne agricole dans le bassin versant de l'Orgeval entre 1990 et 2009.

Sommaire

P7// Avant-propos

O. RÉCHAUCHÈRE (Rédacteur en chef) et M. BENOÎT (Président de l'Afa)

P9// Édito

M.H. JEUFFROY, D. BAZILE, V. BEAUVAL, X. PINOCHET et T. DORÉ (coordonnateurs du numéro)

P11// Objectifs de production et variétés

P13- Variétés et itinéraires techniques du blé : une évolution vers la diversification

A. GAUFFRETEAU (Inra), G. CHARMET (Inra), M.H. JEUFFROY (Inra), J. LE GOUIS (Inra), J.M.

MEYNARD (Inra), B. ROLLAND (Inra)

P23- Variétés et systèmes de culture de tomate : les apports conjoints de la génétique et de l'agronomie

F. LECOMPTE (Inra) et M. CAUSSE (Inra)

P35- Réflexions sur l'évolution des cépages et des modes de conduite de la vigne dans le saumurois

A. HILLAIRE (Vigneron)

P37- L'inscription au catalogue officiel : un outil évolutif au service d'une agriculture durable

F. MASSON (GEVES), C. LECLERC (GEVES)

P47- Etude préliminaire à la caractérisation du comportement des variétés de colza oléagineux d'hiver dans des itinéraires techniques particuliers sur la base du réseau CTPS existant

(Article dont la première publication a été faite dans la revue en ligne Innovations agronomiques, volume 35 / Mai 2014)

P. BAGOT (GEVES), F. SALVI (CETIOM), J. GOMBERT (GEVES)

P55- Quelle place de la génétique dans le futur avec la perspective d'augmenter la production et d'apporter une contribution positive à l'environnement : exemple des céréales

P. GATE (ARVALIS Institut du végétal)

P63// Explorer la relation Génotype x Environnement

P65- Conception d'idéotypes variétaux en réponse aux nouveaux contextes agricoles et environnementaux

P. DEBAEKE (Inra), A. GAUFFRETEAU (Inra), C.E. DUREL (Inra), M.H. JEUFFROY (Inra)

P75- De l'interaction G x E aux interactions G x Y x L x C x R x D x S x A : une approche participative et pluridisciplinaire

D. DESCLAUX (Inra), Y. CHIFFOLEAU (Inra), J.M. NOLOT (Inra)

P85- Effets de la latitude sur l'expression du photopériodisme du mil et du sorgho : validation des cartes d'adaptation variétale au Mali

A. FOUNÉ (Icrisat, Mali), M. SAKO (Cirad), M. VAKSMANN (Université Paris 8), M. KOURESSY (IER, Mali)

P95// Quelles perspectives offre la prise en compte des aspects spatio-temporels de la diversité génétique ?

P97- Variétés et systèmes de culture : élargissement des échelles spatiales, quelques exemples pour les espèces oléagineuses

X. PINOCHET (CETIOM)

P103- Associer des variétés pour la production et maîtriser les maladies

T. VIDAL (Inra), C. GIGOT (AgroParisTech), M. BELHAJ FRAJ (ICBA, Dubai), M. LECANTE (Inra), L. HUBER (Inra), S. SAINT-JEAN (AgroParisTech), C. DE VLLAVIEILLE-POPE (Inra)

P113- Le mélange de variétés en blé : une pratique devenant plus fréquente

E. DENIS (CIVAM Sarthe)

P115- Impact de la diffusion d'une variété améliorée de sorgho au Mali : interaction avec les variétés locales

M. KOURESSY, S. SISSOKO, N. TÉMÉ, M. DEU, M. VAKSMANN, Y. CAMARA D. BAZILE, A. F.M. SAKO, A. SIDIBÉ

P125// Quel potentiel de modèles alternatifs d'amélioration des plantes ?

P127- Questions induites par la diffusion des variétés de tournesol tolérantes à des herbicides de la famille des inhibiteurs de l'ALS

V. BEAUVAL (Agriculteur)

P135- Les variétés de soja tolérantes aux herbicides, moteur de la spécialisation agricole dans la région pampéenne argentine

C. SALEMBIER (Inra), S. GROSSO (UNL, Argentine), J.M. MEYNARD (Inra)

P143- Inscription d'une variété de sorgho obtenue par sélection participative au Mali dans des projets multi-acteurs

T. LEROY (Cirad), O. COUMARE (AOPP – Mali), M. KOURESSY (IER – Mali), G. TROUCHE (Cirad), A. SIDIBE (IER – Mali), S. SISSOKO (IER – Mali), A.

TOURÉ (IER – Mali), T. GUINDO (COAP – Mali), B. SOGOBA (AMEDD – Mali), F. DEMBELÉ (GRAADECOM – Mali), B. DAKOUO (UACT – Mali), M.

VAKSMANN (Cirad), H. COULIBALY (IER – Mali), D. BAZILE (Cirad), D. DESSAUW (Cirad)

P153- Mise en œuvre de nouvelles stratégies de sélection du sorgho pour les régions marginales et à forte contrainte climatique du Mali

A. BOUBACAR (IER – Mali), A. DAOU (Icrisat – Mali), E. WELTZIEN (Icrisat – Mali), B. DAKOUO (UACT – Mali), B. SOGOBA (AMEDD – Mali), O.

NIANGALY (IPR/IFRA – Mali), S.B. COULIBALY (IER – Mali), H. Moussa MAIGA (USTT – Mali), B. KONÉ (UACT – Mali), H. MAIGA (AMEDD – Mali), G.

TROUCHE (Cirad), K. VOM BROCKE (Cirad)

P165- Mobiliser la diversité génétique pour un choix variétal plus large ; blocages et opportunités en agronomie et en génétique

C. BILLOT (Cirad), C. LECLERC (Cirad), S. LOUAFI (Cirad), A. BARNAUD (Ird), X. PERRIER (Cirad)

P169// Annexe

P171- Appel à contribution du numéro

P173// Note de lecture

P175- La palme des controverses – Palmier à huile et enjeux de développement (A. Rival et P. Lelang, Editions QUAE, 2013)

T. DORÉ (AgroParisTech)

P177// Texte hors thématique du numéro

P179- Les « carnets de plaine » des agriculteurs : une source d'information sur l'usage des pesticides à l'échelle de bassins versants

C. SCHOTT (Inra), F. BARATAUD (inra), C. MIGNOLET (Inra)

